

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

EGEMAEL VIESSER

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL POROSO EM TITÂNIO PARA TUBOS DE
CALOR

Joinville

2018

EGEMAEL VIESSER

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL POROSO DE TITÂNIO PARA TUBOS DE
CALOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, como parte dos requisitos para obtenção do título de engenheiro Aeroespacial.

Orientador: Dr.Eng. Kleber Vieira de Paiva.

Joinville

2018

EGEMAEL VIESSER

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL POROSO DE TITÂNIO PARA TUBOS DE
CALOR

Esta Monografia foi julgada e aprovada para obtenção do título de “Engenheiro Aeroespacial”, e aprovado em sua forma final pelo curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 12 de novembro de 2018.

Prof.^a Talita Sauter Possamai, Dr.^a.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Kleber Vieira de Paiva. Dr.
Presidente/Orientador.

Prof. Marcos Alves Rabelo. Dr.

Prof. Marcus Vinicius Volponi Mortean . Dr.

.

Agradecimentos

Gostaria, primeiramente, agradecer à toda minha família, em especial meus pais Giovani Rogério Viesser e Iguaracema Viesser, por todo auxílio e incentivo concedidos durante todos os anos de minha vida e principalmente nessa etapa.

Ao meu orientador Kleber Paiva, pelo auxílio no desenvolvimento das bancadas, execução dos testes, parceria e pelas horas de conversa.

Ao Henrique Rodrigues Oliveira, pesquisador na área de manufatura aditiva do instituto SENAI de inovação em processamento a Laser de Joinville pela colaboração na fabricação das amostras para caracterização.

A todos os demais contribuintes, indiretos e diretos, a realização deste trabalho, obrigado.

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico computacional é responsável pelo aumento na velocidade do processamento de dados dos componentes eletrônicos e a redução no tamanho destes. Como o processamento de dados está relacionado diretamente à movimentação de elétrons, existe uma geração de calor cada vez maiores em áreas cada vez menores. Para que estes componentes eletrônicos funcionem de forma adequada, é preciso mantê-los a uma temperatura abaixo de um valor limite, evitando-se assim sua degradação como é o caso dos painéis solares usado em nano satélites que será mostrado nesse trabalho. Torna-se necessário então, produzir dissipadores de calor eficientes, que consigam manter os componentes com valores de temperaturas o mais próximo possível da temperatura ideal de trabalho. Uma das tecnologias utilizadas neste caso é o minitubo de calor, sendo este, um dispositivo desenvolvido para transferir calor, mesmo quando sujeitos a pequenos gradientes de temperatura. Atualmente o T2F (Termo Fluid Flow) estuda o comportamento destes minitubos. A proposta deste trabalho é desenvolver uma tecnologia para a fabricação de minitubos usando manufatura aditiva além de estudar os fenômenos que envolvem o funcionamento de tubos de calor para aplica-lo em um nanosatélite.

Palavras-chave: Sinterizado. Minitubos. SLM

ABSTRACT

The computational technological development is responsible for the increase in the data processing speed of the electronic components and the reduction in their size. Since data processing is directly related to the movement of electrons, there is a need to generate larger amounts of heat in smaller areas. In order for these electronic components to work properly, they must be kept at a temperature below a limit value, thus avoiding their degradation, as is the case of the solar panels used in cubsats that will be shown in this work. It is then necessary to produce efficient heat sinks which are able to keep components with temperatures as close as possible to the ideal working temperature. One of the technologies used in this case is the nano heat-pipe, this being a device designed to transfer large amounts of heat, even when subjected to small temperature gradients. Currently, the T2F (Thermo Fluid Flow) studies the behavior of these heat-pipe, however, without the use of structures made under the SLM (Sinterized Laser Melting) process. The purpose of this work is to develop a technology for the manufacture of mini-tubes using additive manufacture, besides studying the phenomena that involve the operation of heat pipes to apply it in a nanosatellite.

Key-Word: Sinterized. Heat-pipes. SLM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tubo de calor dentro de um CubeSat.....	14
Figura 2 Esquema do princípio de funcionamento de um termo sifão.....	17
Figura 3 Funcionamento tubo de calor.....	17
Figura 4 Tubo de calor com amônia usado para transferir calor de eletrônicos para painéis radiativos	18
Figura 5 Minitubos de calor.....	19
Figura 6 Circuito trocador de calor	20
Figura 7 Numero de Mérito.....	23
Figura 8 Ascensão do líquido no tubo capilar, onde o ângulo de contato entre o líquido e o material do tubo é menor que 90°	24
Figura 9 Curvatura do menisco e raio do poro r_{ef}	25
Figura 10 Representação de uma gota sobre uma superfície, onde: (a) com fase L possuindo um ângulo de contato $\theta < 90^\circ$ indica uma boa molhabilidade. (b) com fase L possuindo um ângulo de contato $\theta > 90^\circ$ indica uma molhabilidade ruim	26
Figura 11 Representação de meios porosos permeáveis de partículas com diferentes formas geométricas (a); com formação de canais capilares (b); simplificado com partículas	27
Figura 12 Relação P-V	30
Figura 13 Influencia da temperatura na Tensão.	30
Figura 14 Etapa de fabricação de peça em SLM.....	33
Figura 15 Estrutura porosa fabricada em alumínio a partir de técnica SLM.....	34
Figura 16 Estrutura porosa fabrica em titânio a partir de técnica SLM	34
Figura 17 Amostras feitas pelo Senai	36
Figura 18 Processos de fabricação das amostras	36
Figura 19 Amostras sendo secas antes da imersão na câmara de vácuo	38
Figura 20 amostra dentro da câmara de vácuo	39
Figura 21 Componentes da câmara de vácuo, (1) Bomba de vácuo, (2) Câmara de vácuo e (3) Becker com a amostra imersa em água.	39
Figura 22 Amostra utilizada no experimento	41

Figura 23 Bancada experimental para testes de medição de permeabilidade. (1) Regulador de Pressão argônio, (2) Transdutor de pressão diferencial (0-15 psi), (3) Regulador de Vazão, (4) Computador para aquisição de dados, (5) Medidor de vazão.....	41
Figura 24 Bancada experimental (1) Amostra dentro do tubo, (2) Tomada de pressão antes da amostra, (3) Tomada da pressão depois da amostra, (4) Transdutor de pressão diferencial. ...	42
Figura 25 Medidor de Vazão utilizado	42
Figura 26 Bancada experimental para determinação do raio crítico, (1) Transdutor de pressão, (2) Porta Amostra e (3) Controlador de vazão	43
Figura 27 Nucleação da bolha e coluna de água	44
Figura 28 Amostra B6	45
Figura 29 Amostra B7	45
Figura 30 Amostra B8	45
Figura 31 Fluxo de calor Axial X Temperatura	47
Figura 32 Modelo do tubo de calor	48
Figura 33 Modelo de esferas empacotadas.....	51
Figura 34 Gráfico da perda de carga em função da velocidade para cada amostra.....	54
Figura 35 Cad com o Tubo no Cubesat	55
Figura 36 Espessura X Fluxo de Calor.....	56
Figura 37 Variação da taxa de calor com a porosidade.....	57
Figura 38 Variação da permeabilidade com a porosidade.....	57
Figura 39 Influencia do raio médio da partícula e da porosidade sobre a máxima capacidade de transporte de calor	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características dos materiais porosos	20
Tabela 2 Fluido de trabalho, temperatura de operação e estrutura	21
Tabela 3 Classificação do regime de escoamento segundo o número de <i>Rei</i>	29
Tabela 4 Parâmetros variados na SLM	37
Tabela 5 Resultados da porosidade das amostras	52
Tabela 6 Porosidade das amostras encontradas pela tomografia	52
Tabela 7 Diâmetro Crítico e Pressão capilar	53
Tabela 8 Permeabilidade das amostras	54

LISTA DE SIMBOLOS

M	Numero de mérito
ρ_l	Densidade do liquido
σ	Tensão superficial do liquido
λ	Calor latente
μ_l	Viscosidade do liquido
$P_{cap.max}$	Pressão capilar
r_{ef}	Raio do menisco
K	Coefficiente de permeabilidade
μ	Viscosidade absoluta do fluido
ΔP	Variação da pressão capilar máxima
L	Comprimento total da amostra
A	Área da seção transversal da amostra
Q	Vazão do liquido ou gás
Re_i	Reynolds intersticial
u_d	Velocidade absoluta do liquido
d_p	Diâmetro do poro
K_1	Permeabilidade de Darcy
K_2	Permeabilidade inercial
r_c	Raio crítico
g	Aceleração da gravidade
α	Ângulo de molhabilidade solido-liquido
ε	Porosidade
r_w	Raio interno da parede do tubo
r_v	Raio do canal de vapor no tubo
ρ_v	Viscosidade do vapor
μ_v	Viscosidade dinâmica do vapor
ϕ	Ângulo entre a horizontal e o tubo de calor
l	Comprimento total do tubo de calor
K_w	Condutividade térmica efetiva do meio poroso
K_l	Condutividade térmica do material poroso

K_s

Condutividade térmica do material poroso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	NANOSSATÉLITES – PADRÃO CUBESAT	14
2.2	MECANISMOS DE CONTROLE TÉRMICO PARA NANOSATELITES.....	16
2.2.1	Termossifões e Tubos de calor.....	16
2.2.2	Minitubos de calor	18
2.2.3	Fluidos de trabalho.....	21
2.2.4	Fenômenos relacionados ao efeito capilar	24
2.2.5	Tipos de regime de escoamento em um tubo de calor	28
2.3	APLICAÇÃO DE TUBOS DE CALOR EM NANOSSATÉLITES	29
2.4	FUSÃO A LASER	31
2.4.1	Manufatura aditiva para fabricação de tubos de calor	33
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	PÓ DE TITANIO	35
3.2	CORPOS DE PROVA FABRICADOS ATRAVÉS DE SLM	35
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	38
3.3.1	Medição da porosidade	38
3.3.2	Medição de permeabilidade.....	40
3.3.3	Medição do raio Crítico	43
3.3.4	Metalografia	44
3.4	MODELO ANALÍTICO	46
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS.....	52
4.1	MEDIÇÃO DA POROSIDADE	52
4.2	MEDIÇÃO DO RAIO CRÍTICO	53
4.3	MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE.....	53

4.4	RESULTADOS TEÓRICOS.....	55
5	CONCLUSÕES.....	59
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – ROTINA EM EES DO MODELO ANÁLITICO TÉRMICO	64
	ANEXO A DATASHEET DO PÓ DE TITÂNIO.....	67

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da indústria eletrônica no último século, os componentes utilizados em placas de circuitos integrados vem diminuindo de tamanho e aumentando o consumo de energia, isso gerou a necessidade de trocadores de calor mais compactos e que retirassem energia dos componentes mais rapidamente. O espaço para a dissipação de calor nas placas eletrônicas está ficando cada vez menor e isso acabou impulsionando a criação de trocadores de calor mais eficientes.

A corrida espacial, no final da década de 50, possibilitou o avanço em diversas áreas da engenharia, entre elas a parte térmica, pois os satélites precisavam de mecanismos de controle térmico cada vez mais eficiente. A tecnologia de tubos de calor foi empregada como uma solução para mitigar o gradiente térmico no interior do satélite.

Mais recentemente, satélites de pequeno porte que até então eram inviáveis devido aos altos custos de fabricação começaram a ser comercializados industrialmente. Esses satélites são conhecidos como CubSats. O objetivo dessa iniciativa foi popularizar o ensino em engenharia aeroespacial nas universidades devido ao seu custo reduzido. Nas ultimas décadas vem sendo desenvolvido a manufatura aditiva e entre elas a fusão seletiva a laser SLM (selective laser Melting), porem a mesma é pouco usada para a fabricação de tubos de calor devido ao pouco desenvolvimento nessa aplicação específica.

Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo preliminar para o desenvolvimento de meios porosos para tubos de calor utilizando o método da fusão a laser SLM (*Selective laser Melting*) afim de gerar novas aplicações da técnica SLM em nanossatélites

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver estrutura porosa de titânio empregando manufatura aditiva para tubos de calor visando aplica-las em CubSats.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um processo de fabricação de um elemento poroso de titânio utilizando o método SLM;
- Confeccionar amostras de elementos porosos de titânio para caracterização;
- Caracterizar a porosidade, tamanho crítico de poros e permeabilidade das amostras;
- Projetar um tubo de calor usando os dados obtidos na caracterização

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica sobre mecanismos de controle térmico em nanossatélites, tubos de calor, meios porosos e fusão a laser. Serão abordados princípios físicos que regem o funcionamento de tubos de calor, características do titânio e dos fluidos utilizados para a transmissão do calor, além do processo de fabricação do elemento poroso.

2.1 NANOSSATÉLITES – PADRÃO CUBESAT

O padrão CubeSat é uma normalização estabelecida para satélites miniaturizados. Geralmente, são compostos de uma ou mais unidades cúbicas de aresta 10 cm, como ilustra a Figura 1. Cada unidade tem massa não superior a 1,33 quilogramas e é intitulada de 1U. Além de ser leve e pequeno, costuma-se utilizar componentes eletrônicos comerciais fora de prateleira (COTS - *commercial off-the-shelf*) (SPACEDAILY, 2017).

Figura 1 Tubo de calor dentro de um CubeSat.



Fonte: AIAA/USU (2017)

Esse padrão foi criado em 1999 na Universidade Politécnica do estado da Califórnia (*California Polytechnic State University*) e na Universidade de Stanford. Os professores Jordi Puig-Suari de Cal Poly e Bob Twiggs de Stanford propuseram um projeto de referência para o CubeSat com o objetivo de treinar os estudantes de pós-graduação a projetar, construir, testar e operar satélites artificiais dentro do tempo e restrições financeiras de um programa de pós-graduação.

O primeiro CubeSat foi colocado em órbita em junho de 2003 lançado a bordo de um foguete Eurokot russo (SPACEDAILY, 2016). Cerca de 100 CubeSats já foram lançados e muitos outros estão nos estágios de planejamento e desenvolvimento. Até 2013, as universidades e atividades de pesquisa representavam a maioria dos lançamentos da CubeSat. Desde então, mais da metade dos lançamentos do CubeSat tem sido para fins não acadêmicos.

As aplicações geralmente envolvem experimentos que podem ser miniaturizados, fornecendo serviços para observação da Terra e aplicações de rádio amador. Alguns CubeSats são usados para demonstrar tecnologias espaciais ou para definir a viabilidade de um projeto, aspecto que não se justifica em termos de custos em satélites maiores. Em alguns casos, pode ser utilizado para experiências científicas de baixo custo que possam verificar teorias subjacentes. Na maioria das vezes, os CubeSats representam um primeiro satélite nacional para nações que não possuem programas espaciais.

Segundo Souza (2010), os satélites podem ser subdivididos em subsistemas principais, facilitando o desenvolvimento do projeto, a montagem e os testes posteriormente. Tais sistemas são essenciais para o desempenho do veículo espacial, sendo eles: controle de atitude, suprimento de energia, telecomunicações de serviço, gestão de bordo, estrutura e mecanismos, controle térmico, propulsão e carga útil. O controle de atitude monitora o apontamento do satélite. Já o suprimento de energia é responsável por prover a energia necessária a todos os sistemas. A telecomunicação e serviço tem sua importância justificada por enviar e receber os dados que permitem o acompanhamento do funcionamento e o comando do satélite. O quarto sistema ou gestão a bordo processa as informações recebidas ou enviadas para a Terra, e, também, as informações internas do satélite. A estrutura e mecanismos fornece o suporte mecânico e proteção contra as vibrações provenientes do lançamento e da radiação quando em órbita. Em seguida, o controle térmico mantém os equipamentos dentro das faixas aceitáveis de temperatura. A propulsão fornece o empuxo necessário para o controle de atitude e da órbita. Por fim, a carga útil engloba o experimento ou função comercial do satélite.

2.2 MECANISMOS DE CONTROLE TÉRMICO PARA NANOSATELITES

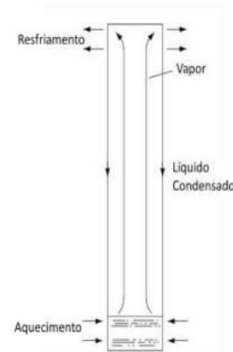
No desenvolvimento de satélites, análises rigorosas são necessárias devido à sua complexidade, custo, componentes especiais e mão de obra altamente qualificada. Uma área de estudo que exige um estudo mais minucioso é a parte do controle térmico, principalmente em nanossatélites como será abordado nesse trabalho. Para a realidade do CubSat, Figura 1, devido ao seu tamanho reduzido, a maioria dos mecanismos tradicionais empregados em satélites de grande porte não podem ser utilizados de maneira direta.

As principais tecnologias, segundo Gilmore (2002), utilizadas para o controle térmico em satélites convencionais são: capacitores térmicos (PCM), refrigeradores termoelétricos (TEC), radiadores espaciais, venezianas térmicas, pinturas e tubos de calor, neste trabalho focaremos em tubos de calor devido a sua importância em CubSats como será mostrado mais adiante.

2.2.1 Termossifões e Tubos de calor

Em meados de 1800 já existia registro das primeiras patentes relacionadas a termossifões feitas por A.M Perkins e J Perkins. Termossifões bifásicos são dispositivos de transferência de calor de alta eficiência. São constituído basicamente de um tubo metálico com as extremidades fechadas, após evacuado o ar do seu interior é adicionado um fluido de trabalho, que normalmente é água. Quando um fluxo de calor é aplicado em sua extremidade inferior, o fluido vaporiza e por diferença de pressão gerado se desloca para o extremo superior do tubo onde o calor é rejeitado, após isso o líquido retorna a região do evaporador pelo efeito da gravidade (REAY, 2006). O esquema ilustrando o princípio de funcionamento de um termossifão pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 Esquema do princípio de funcionamento de um termo sifão

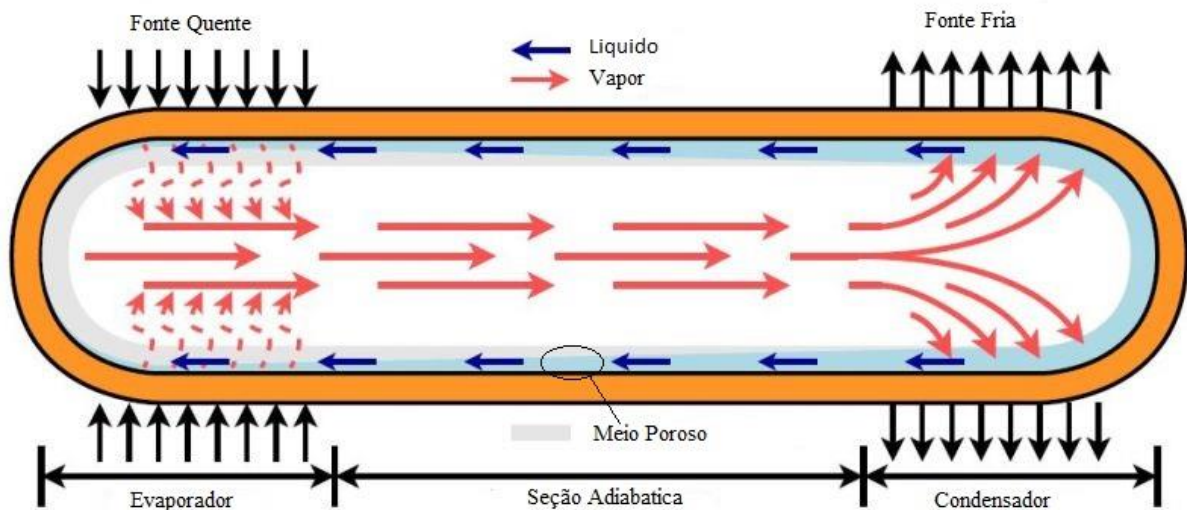


Fonte: adaptado de Reay (2006)

O tubo de calor é semelhante a um termosifão, porém o líquido após condensar retorna ao evaporador, não por ação da gravidade, mas sim, movido pela força de capilaridade do meio poroso. Devido à presença do meio poroso, o tubo de calor pode operar em qualquer posição, inclusive em ambientes sem gravidade, o que fez dele um dispositivo importante para a indústria aeroespacial (FAGRI, 1955).

Na Figura 3, pode-se observar um esquema do funcionamento de um tubo de calor.

Figura 3 Funcionamento tubo de calor



Fonte: adaptado Reay, (2006)

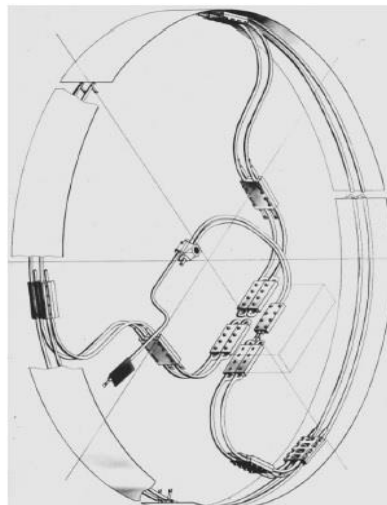
Os termosifões e tubos de calor são teoricamente divididos em três regiões: evaporador, onde o calor adentra o sistema, a seção adiabática, onde não há troca térmica e o condensador, onde o calor é retirado do sistema.

2.2.2 Minitubos de calor

Vasiliev (2006), define mini tubo de calor como sendo um tubo de seção circular com diâmetro variando em torno de 2 a 4 mm. Segundo Reay (2006), a necessidade da miniaturização de trocadores de calor está em ascensão, sendo tão necessária quanto a necessidade aumentar a quantidade de processamento por unidade de operação.

No espaço existem inúmeras aplicações para tubos de calor, o mais comum é a utilização de tubos de calor com amônia como fluido de trabalho. A função mais importante é transferir energia de regiões mais quentes e transmiti-las para outras mais frias. Na Figura 4 é mostrado um trocador de calor onde o calor dos equipamentos eletrônicos do satélite é transmitido para a face externa usando um anel radiador.

Figura 4 Tubo de calor com amônia usado para transferir calor de eletrônicos para painéis radiativos



Fonte: Maydanik (2004)

De acordo com Masoud (2012), os minitubos de calor (Figura 5) são de vital importância para controlar as variações extremas de temperatura em componentes eletrônicos, em ambiente sem gravidade. Os minitubos de calor não sofrem o desgaste de peças moveis, sendo desta forma, um dispositivo de alta confiabilidade para tal aplicação.

O método convencional de fabricação de tubos de calor tem mostrado algumas limitações em termos de desempenho, pois para geometrias curvas a fabricação fica comprometida devida a dificuldade de manter a distribuição homogênea do meio poroso na

região curva. Para tubos de calor em titânio, a principal vantagem é a alta permeabilidade e a baixa resistência térmica porém a restrição tem sido produzir a estrutura porosa. A técnica de fusão a laser (SLM) é usada neste projeto como um novo método de fabricação de meios porosos para tubos de calor a fim de superar esta limitação.

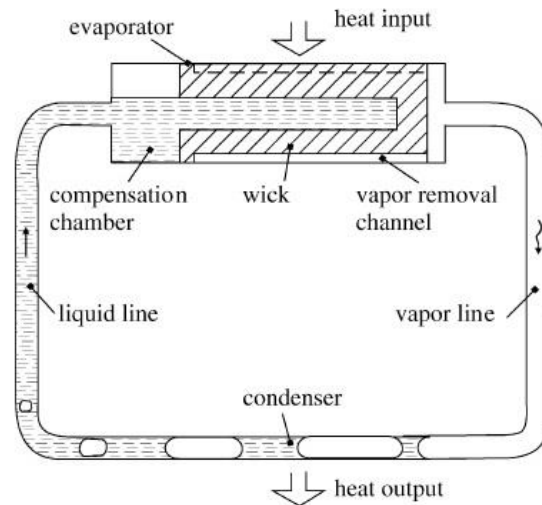
Figura 5 Minitubos de calor



Fonte: Masoud (2012).

Loop Heat Pipes (LHP), ou seja, tubos de calor em circuito como mostrado na Figura 6, nada mais são do que um tubo de calor em forma de circuito onde a fonte quente fica em uma extremidade e a fonte fria na outra. A estrutura capilar fica concentrada na região do evaporado, conferindo melhor desempenho térmico.

Figura 6 Circuito trocador de calor



Fonte: Maydanik (2004).

O principal material usado na fabricação de LHP é o aço inoxidável, pois é compatível com diversos tipos de soldagem hermética a vácuo e possui uma resistência suficientemente alta. A desvantagem do aço inoxidável é a sua condutividade térmica relativamente baixa em comparação com outros materiais. O cobre tem se mostrado um material bem promissor para uso de LHP. Pó de níquel sintetizado e titânio são mais empregados na fabricação do material poroso interno do tubo, pois são ideais para obter estruturas capilares com tamanho de poro pequeno, além de possuírem uma baixa resistência térmica e são compatíveis com muitos fluidos de trabalho a alta temperatura (MAYDANIK, 2004).

A partir de pós metálicos nesse trabalho tentaremos obter uma permeabilidade e porosidade no tubo sinterizado com titânio próximo ao apresentado na Tabela 1. Existem também exemplos bem-sucedidos de materiais porosos poliméricos, cerâmicos, de cobre e de aço inoxidável mais baratos.

Tabela 1 Características dos materiais porosos

Characteristics of capillary structures

Material	Porosity, %	Effective pore radius, μm	Permeability, $\times 10^{13}$, m^2	Thermal conductivity, W/m K
Nickel	60–75	0.7–10	0.2–20	5–10
Titanium	55–70	3–10	4–18	0.6–1.5
Copper	55–75	3–15	–	–

Fonte: Maydanik (2004).

2.2.3 Fluidos de trabalho

A escolha de fluidos de trabalho para os tubos de calor é realizada com base nos mesmos critérios. Neste caso deve-se levar em conta o gradiente de pressão com a temperatura dP/dT , que deve ser suficientemente alta para garantir que o dispositivo a uma diferença mínima de temperatura entre a zona de evaporação e a câmara de condensação opere de acordo com as condições de projeto.

A seleção correta do fluido de trabalho é o primeiro e talvez mais importante passo para o projeto de um tubo de calor. Sua escolha vai depender da faixa de operação onde será aplicado na realidade. O fluido mais comum para aplicação aeroespacial é a acetona ou metanol pois tem a pressão capilar mais baixa o que ajuda na permeabilidade como será mostrado mais adiante, além de suportar temperaturas negativas sem mudar para o estado sólido. Na Tabela 2 é mostrado alguns líquidos com suas respectivas faixas de operação e a estrutura do tubo de calor onde ele mais é aplicado.

Tabela 2 Fluido de trabalho, temperatura de operação e estrutura

Fluido de trabalho	Temperatura de operação (°C)	Estrutura do tubo de calor
Dióxido de carbono	-50 a 30	Alumínio, Aço e titânio
Nitrogênio	-200 a -160	Aço inox
Acetona	-50 a 120	Alumínio e Aço inox
Amônia	-75 a 125	Alumínio e Aço Inox
Metanol	-75 a 120	Cobre e aço Inox
Água	1 a 325	Cobre, Níquel e Titânio

Fonte: Thermacore a) (2012).

Angelo (2008) cita que para se utilizar uma substância como fluido de trabalho em um tubo de calor, usualmente analisam-se dois fatores: a pressão de vapor e o número de mérito. A pressão de vapor é uma propriedade física que depende intimamente do valor da temperatura. Qualquer que seja a temperatura, a tendência é de o líquido se vaporizar até atingir equilíbrio termodinâmico com o vapor. Em termos cinéticos, esse equilíbrio se manifesta quando a taxa de líquido vaporizado é igual à taxa de vapor condensado. O mérito relativo de cada fluido pode ser mensurado considerando algumas características. Abaixo serão citadas algumas:

- Em uma faixa de operação é desejado que o fluido possua baixa pressão de vapor a fim de ajudar na produção de gases condensáveis no interior do tubo. (Reay & Kew,2006).
- O desempenho é máximo do fluido no tubo de calor na vizinhança do fluido quando o mesmo está no seu ponto de ebulição (Chi,1976).

Com algumas simplificações, Chi (1976) mostra que para um tubo com estrutura porosa e dimensões definidas, o calor transportado é diretamente proporcional a combinação das propriedades do líquido e é chamado de “Numero de Mérito”. Número de mérito elevado são desejáveis na faixa de operação projetada. A Equação 1 nos mostra como calculamos o mesmo.

$$M = \frac{\rho_l \sigma \lambda}{\mu_l} \quad (1)$$

onde:

M:Numero Mérito, W/m²

ρ_l :Densidade do líquido, Kg/m³

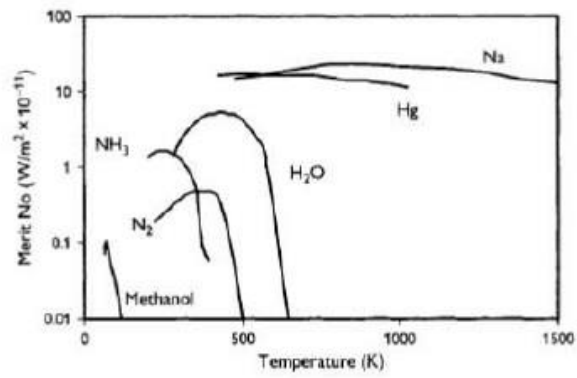
σ :Tensão superficial do líquido, N/m

λ :Calor latente, J/Kg

μ_l :Viscosidade do líquido, Pa. s(Kg/m.s)

Como é mostrado na Figura 7, a amônia (NH₃) apresenta maior número de mérito entre – 40°C e 80°C, porém nesse projeto iremos utilizar o fluido metanol, devido à alta periculosidade em se manusear amônia.

Figura 7 Numero de Mérito



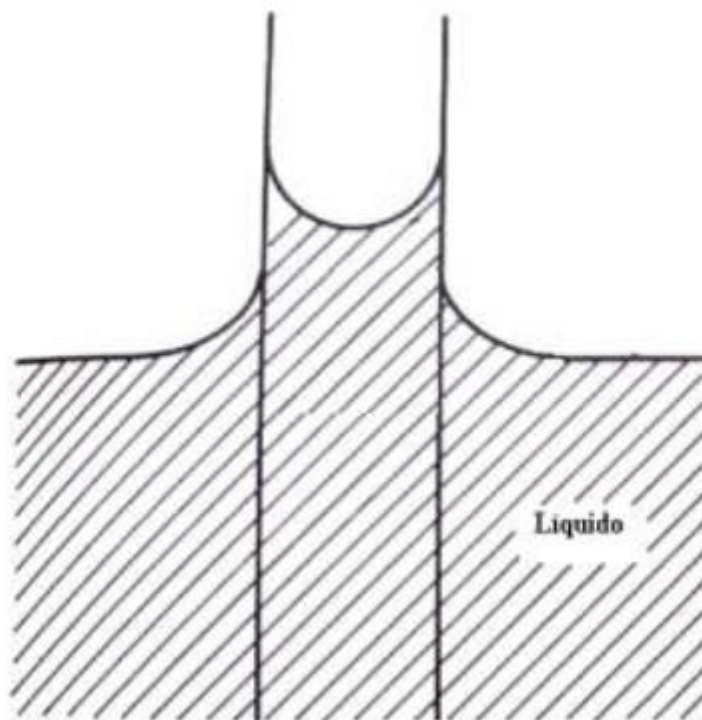
Fonte: Masoud (2012)

2.2.4 Fenômenos relacionados ao efeito capilar

2.2.4.1 Capilaridade

Em tubos de calor a capilaridade se dá devido a tensão superficial e o meio sólido. No interior do tubo o líquido está sujeito a duas forças que seriam de adesão e coesão, a força de adesão é a atração entre moléculas do líquido e do vapor, ou entre a do líquido e do material sólido do tubo. No caso da força de coesão, seria a afinidade entre as moléculas semelhantes do próprio líquido. Na figura 8 é mostrado o esquema de como se comporta o líquido no interior do tubo.

Figura 8 Ascensão do líquido no tubo capilar, onde o ângulo de contato entre o líquido e o material do tubo é menor que 90°



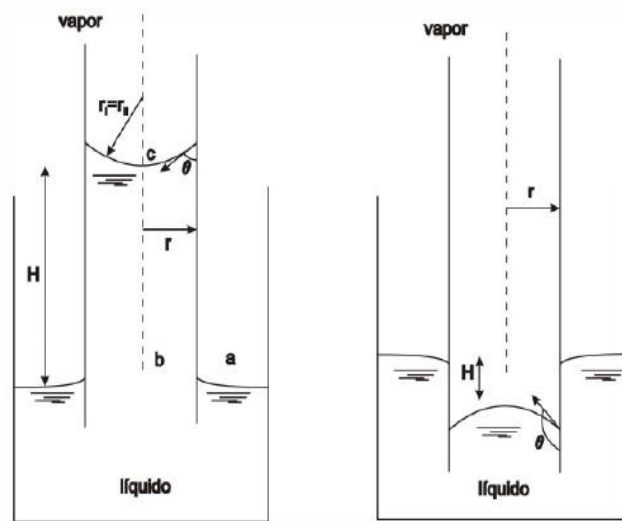
Fonte: Wolf (2006).

Existe uma forte interação entre as moléculas da superfície do líquido e da superfície do sólido, fazendo com que o líquido suba a parede do tubo devido à força de adesão, formando um menisco. Como o raio do tubo capilar é pequeno, na medida em que as moléculas próximas a parede sobem, a força de coesão entre as moléculas do líquido faz com que as que estão no

centro do tubo acompanhem aquelas que estão próximas a parede. Desta forma é possível observar uma diferença de altura entre a superfície do líquido que está dentro do tubo e a que está fora. O líquido sobe até ser equilibrado pelo peso da coluna de água.

A pressão capilar é função do raio do menisco, que por sua vez, para tubos de calor, será função do raio efetivo do poro r_{ef} , definida como equação de Young Laplace conforme Figura 9 e Equação 2.

Figura 9 Curvatura do menisco e raio do poro r_{ef}



Fonte: Mantelli (2006).

$$P_{cap.max} = \frac{2\sigma}{r_{ef}} \quad (2)$$

Onde $P_{cap.max}$ é a pressão capilar

σ é a tensão superficial do líquido

r_{ef} é o raio do menisco

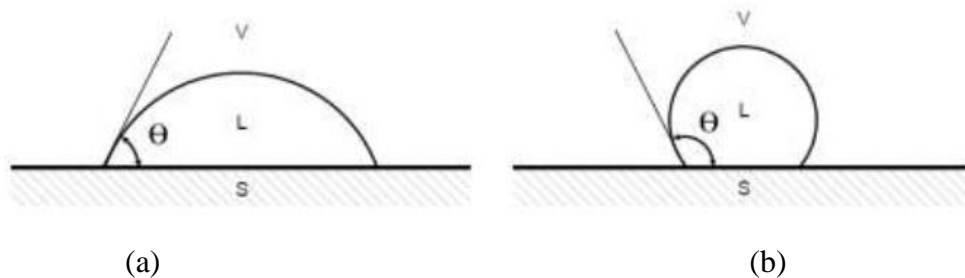
2.2.4.2 Tensão Superficial

As atrações intermoleculares que dão origem as tensões interfaciais podem resultar de diferentes tipos de forças moleculares. Em equilíbrio, uma molécula de um líquido será atraída por outras ao seu redor, e na média não experimentará nenhuma força resultante. Quando o líquido entra em contato com vapor ou sólido, as forças de atração sobre as moléculas situadas na superfície do líquido ou perto delas, não estarão mais em equilíbrio e estas sofrerão uma força resultante, normal a direção da superfície do líquido. Devido a este efeito, o líquido tenderá a assumir um formato que apresente uma área de superfície mínima, que, no caso de uma gota de água em queda livre no vácuo, será uma esfera. Devido a esta tendência espontânea de se contrair, a superfície do líquido se comporta como uma membrana de borracha sob tensão. Esta propriedade é fundamental na seleção e caracterização de um líquido para ser utilizado em tubos de calor (FAGHRI et al., 1995).

2.2.4.3 Ângulo de contato e molhabilidade

Segundo Wolf (2006), o ângulo de contato é um parâmetro físico que representa o equilíbrio entre a energia interfacial das fases líquida, sólida e gasosa. Para haver o molhamento de um sólido por um líquido, a energia livre deve decrescer. Uma boa molhabilidade pode ser observada na Figura 10 (a), enquanto que uma situação onde há pouca molhabilidade pode ser observada na Figura 10 (b). As letras V,L e S, simbolizam as fases gasosa, líquido e sólido respectivamente.

Figura 10 Representação de uma gota sobre uma superfície, onde: (a) com fase L possuindo um ângulo de contato $\theta < 90^\circ$ indica uma boa molhabilidade. (b) com fase L possuindo um ângulo de contato $\theta > 90^\circ$ indica uma molhabilidade ruim



Fonte: Wolf (2006).

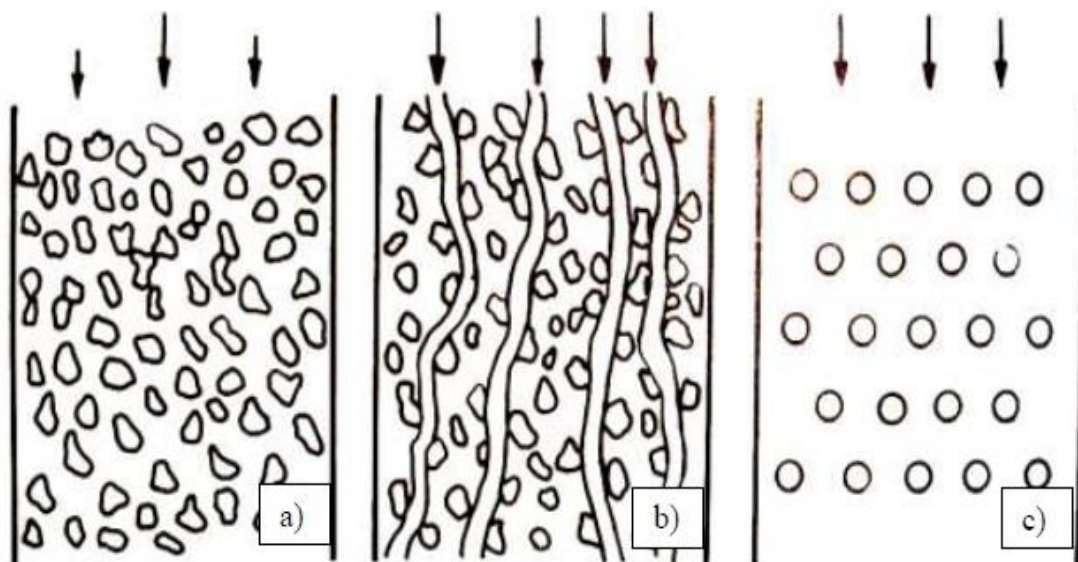
De acordo com Faghri (1995), o ângulo de contato depende unicamente das propriedades físicas das três fases que estão em contato, sendo independente da gravidade ou formato da superfície. Nas linhas de contato entre as três fases existem tensões sendo aplicadas.

Luz et al (2008) cita que a superfície de um sólido tem sempre um excesso de energia comparado ao seu interior e os átomos superficiais tem energia mais alta que os internos que estão rodeados de vizinhos. Desta forma, pode-se entender que a molhabilidade seria a afinidade entre uma superfície sólida e uma superfície líquida, ou seja, a capacidade de uma superfície sólida de ficar molhada quando em contato com um líquido cuja tensão superficial foi reduzida, de modo que o líquido se espalha sobre a superfície do sólido.

2.2.4.4 Permeabilidade

Um meio poroso permeável com poros comunicantes é formado por diversas partículas com diferentes tamanhos e formas. Contudo, este meio pode ser simulado como uma montagem de canais capilares ou um agrupamento de partículas esféricas de mesmo tamanho, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 Representação de meios porosos permeáveis de partículas com diferentes formas geométricas (a); com formação de canais capilares (b); simplificado com partículas



Fonte: Calister 2002

Segundo Calister (2002) o parâmetro que caracteriza a permeabilidade foi primeiramente identificado por Darcy, cujo nome é coeficiente de permeabilidade e é dado pela equação 3.

$$K = -\frac{\mu QL}{\Delta PA} \quad (3)$$

Onde K é o coeficiente de permeabilidade, μ é a viscosidade absoluta do fluido, Q é a vazão de líquido ou gás, L é o comprimento da amostra, ΔP é a diferença de pressão e A é a área da amostra. Na Tabela 1 foram mostrados as faixas de permeabilidade, de diferentes pós metálicos.

2.2.5 Tipos de regime de escoamento em um tubo de calor

A determinação do regime de escoamento de um fluido em um elemento poroso é importante para determinar a perda de carga sofrida pelo fluido. O regime de escoamento é afetado principalmente por dois fatores. Um deles é a viscosidade absoluta (μ) que quanto maior seu valor, maior o atrito entre as moléculas do próprio fluido, ocorrendo perda de energia por condução. Outro fator é o atrito entre o fluido e a parede do meio poroso, sendo que quanto maior a área de contato entre o fluido e o meio poroso, maior será a perda de carga. Para determinar o tipo do regime de escoamento, utiliza-se o número de Reynolds Intersticial (R_{ei}), definido pela equação 4.

$$R_{ei} = \frac{\rho u_d d_p}{\mu} \quad (4)$$

Onde (ρ) é a massa específica do fluido, (μ) é a viscosidade absoluta do fluido, (u_d) é a velocidade pontual no interior de um poro de diâmetro (d_p). Darcy em 1856, considerando o efeito do atrito sobre a queda de pressão no elemento poroso, propôs que para baixas velocidades existia uma relação linear entre a queda de pressão e a velocidade do fluido dada por:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu u_d}{K_1} \quad (5)$$

Onde dp é a variação da pressão, dx o comprimento da estrutura porosa e K_1 é a constante de permeabilidade de Darcy. Reynolds em 1900 e Forcheimer, em 1901, verificaram que um aumento na velocidade do fluido a lei de Darcy não apresentava bons resultados. Com isso através de análises experimentais chegaram a relação parabólica entre a queda de pressão e velocidade neste caso, que se devia a variação da energia cinética de um fluido incompressível durante seu escoamento pelo meio poroso (INNOCENTINI,1999).

Desta forma, Forcheimer acrescenta um novo termo na equação de Darcy. Este termo representa os efeitos cinéticos, onde K_2 é uma constante chamada de permeabilidade inercial. A equação de Forchheimer é dada por:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu u_d}{K_1} + \frac{\rho u_d^2}{K_2} \quad (6)$$

Na tabela 3, observam-se as classificações do tipo de regime de escoamento com relação ao número de Reynolds intersticial. Nesse trabalho iremos calcular o número de Reynolds para cada velocidade do escoamento e após isso calcularemos as permeabilidades seguindo a equação 6.

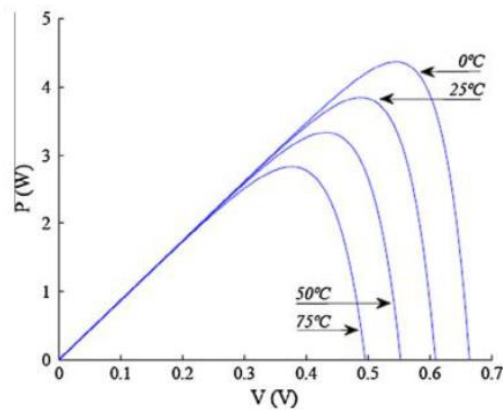
Tabela 3 Classificação do regime de escoamento segundo o número de Re_i

$Re_i < 1$	$1 < Re_i < 150$	$Re_i \geq 150$
Lei de Darcy	Lei de Forchheimer	-
Efeitos viscosos	Efeitos inerciais	Regime turbulento

2.3 APLICAÇÃO DE TUBOS DE CALOR EM NANOSSATÉLITES

No desenvolvimento de satélites, análises rigorosas são necessárias devido à sua complexidade, custo, componentes especiais. Um dos principais obstáculos do funcionamento dos painéis solares utilizados em nanossatelites é o superaquecimento devido a radiação solar excessiva e altas temperaturas ambientes. O superaquecimento reduz a eficiência dos painéis drasticamente (AKBARZADEH A; WADOWSKI, 1996). Na figura 12 é mostrado a relação P-V entre a saída de energia elétrica da célula solar e a tensão de saída V(Volts) supondo uma incidência solar e um modulo de temperatura T constantes.

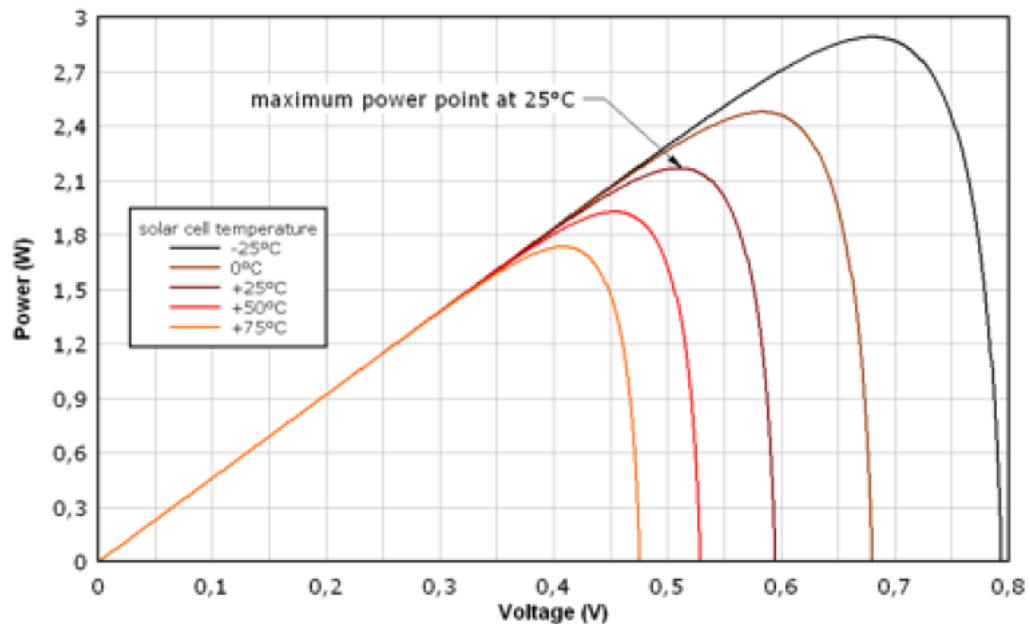
Figura 12 Relação P-V



Fonte: K.A.Moharram et al (2013)

De acordo com Popovici (2016), a cada grau Celsius acima de 25°C o coeficiente de temperatura é de -0,45%, ou seja, um aumento de 25°C diminuiu a conversão da radiação solar em 11,25%. Para um resfriamento da placa solar em 25° C e 50°C a eficiência aumenta em 14,2% e 35,7%, conforme mostra a Figura 13. Isso indica que o aquecimento dos painéis fotovoltaicos pode afetar significativamente a eficiência das placas solares, e para amenizar esses efeitos são usados os tubos de calor em CubSats.

Figura 13 Influencia da temperatura na Tensão.



Fonte: Popovici (2016)

Durante a presente pesquisa bibliográfica apenas um artigo relacionado à aplicação de tubos de calor em nanossatélite foi encontrado. Isaacs et al (2017)., descrevem o desenvolvimento de testes iniciais e de modelagem de um tubo de calor flexível chamado FlexCool, atualmente em desenvolvimento pela empresa Rocco. Usando acetona como o fluido de trabalho, o tubo de calor apresentou uma condutividade térmica média efetiva de 2149 W/mK, que é aproximadamente cinco vezes superior à condutividade térmica do cobre puro. A partir de então os autores desenvolveram uma metodologia utilizando métodos numéricos para otimizar o projeto destes dispositivos e maximizar a transferência de calor.

Sendo assim, a utilização de dispositivos como o minitubo de calor para controle térmico de nanossatélites é relativamente nova, motivando iniciativas como a da presente proposta e contribuindo para a inovação tecnológica do setor espacial brasileiro.

2.4 FUSÃO A LASER

Atualmente, as técnicas de fabricação conhecidas por Manufatura Aditiva têm atraído a atenção da indústria, em especial as técnicas de fabricação por adição de material empregando materiais metálicos. Estes processos oferecem a possibilidade de fabricação de peças complexas com propriedades mecânicas semelhantes às aquelas fabricadas pelos métodos tradicionais envolvendo a remoção de material (usinagem). As principais técnicas de manufatura rápida, conhecidas no mercado atual, que permitem a produção de protótipos e componentes metálicos funcionais são (KRUTH et al, 1998 e YADROITSEV, 2007):

- a) Fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting* - SLM).
- b) Sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering* – SLS).
- c) Deposição de metal a laser (*Laser Metal Deposition* – LMD).

Dentre as tecnologias citadas, a SLM vem se destacando no cenário tecnológico de fabricação, pois é a técnica de manufatura rápida que produz peças com propriedades mecânicas mais próximas dos métodos tradicionais de fabricação, empregando o forjamento para a confecção da matéria-prima e processos de usinagem para conferir a forma geométrica do produto final.

No processo SLM, o pó metálico é completamente fundido, sendo que esta particularidade tem o objetivo de criar peças metálicas muito próximas da densidade total, que

pode ser utilizável sem a necessidade de pós-processamento, permitindo a fabricação de peças metálicas com geometrias complexas e propriedades comparáveis às do material fabricado convencionalmente (ABE et al, 2001; BADROSSAMAY e CHILDS, 2007; YADROITSEV e SMUROV, 2007).

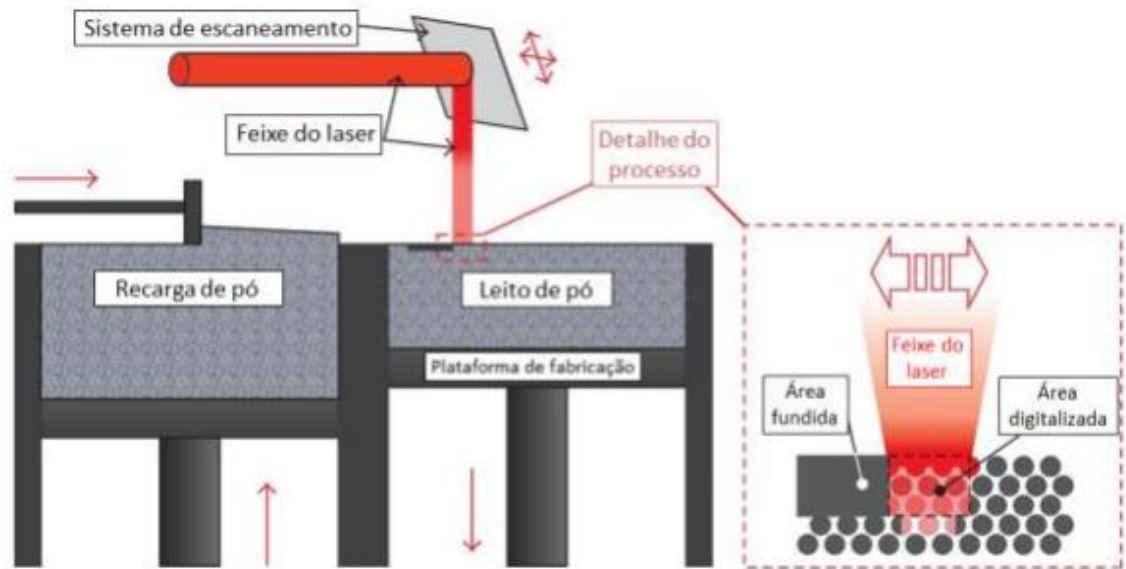
Desta forma abre novas perspectivas para o desenvolvimento de componentes metálicos, os quais seriam impossíveis, inviáveis ou de difícil fabricação pelos métodos convencionais. Este trabalho visa usar a técnica SLM a fim de desenvolver um método novo para obtenção de um meio poroso que possa ser usado em tubos de calor.

Semelhante as tradicionais técnicas de prototipagem rápida, o processo SLM inicia-se diretamente do modelo CAD 3D do produto a ser fabricado. Empregando um software específico esta geometria é dividida em secções transversais. Um feixe de laser, que se movimenta conforme estas secções divididas pelo software, é responsável pela fusão seletiva do pó metálico, disponível na mesa da máquina, solidificando o material em cada secção. Cada secção (camada) da peça é sequencialmente preenchida com linhas alongadas (filetes) de pó fundido (YADROITSEV e SMUROV, 2007).

A SLM é uma técnica promissora para a produção de peças utilizando uma variedade de ligas metálicas de engenharia de alta qualidade que não podem ser facilmente fabricadas por métodos convencionais de fabricação. Além da possibilidade da fabricação de pequenos lotes de produtos customizados sem a necessidade da fabricação de moldes protótipos (ZHANG, LEE. 2011).

A operação essencial do processo SLM é o escaneamento do feixe de laser sobre a superfície de uma fina camada de pó previamente depositada sobre um substrato. O processo de formação continua ao longo da direção de exploração do feixe de laser. Cada camada da peça é sequencialmente preenchida com filetes alongados de pó fundido, ou seja, peças fabricadas por SLM é a sobreposição de filetes e camadas. Uma vez que os objetos 3D em SLM são construídos camada por camada, a morfologia da camada determina as propriedades do produto final (YADROITSEV e SMUROV, 2007). As etapas de fabricação de uma peça 3D por SLM é apresentada na Figura 14.

Figura 14 Etapa de fabricação de peça em SLM

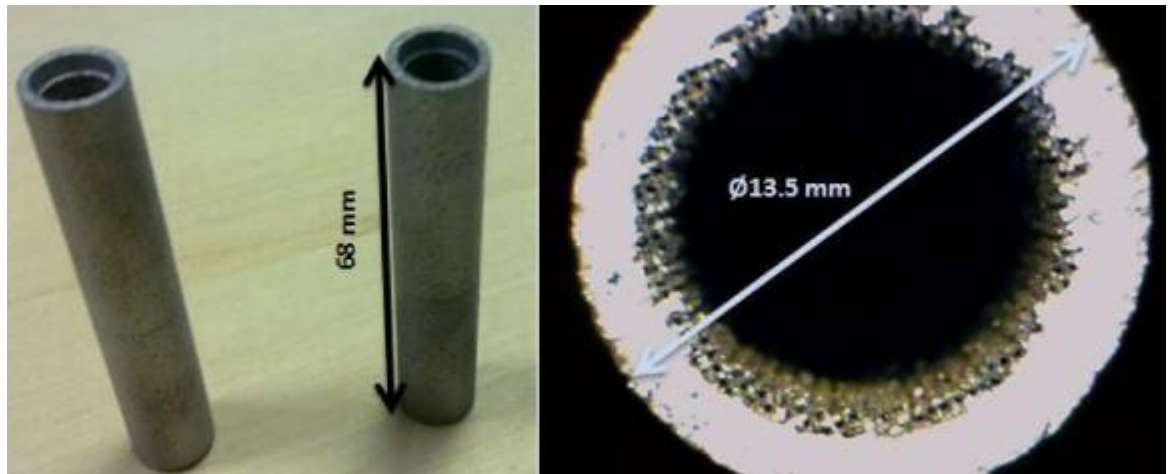


Fonte: Tsouknidas (2011)

2.4.1 Manufatura aditiva para fabricação de tubos de calor

Masoud (2012) desenvolveu um novo método de fabricação de tubo de calor, com meio poroso em alumínio, com base na técnica de fabricação SLM. O trabalho mostrou que a técnica SLM é realmente viável com vantagens interessantes sobre os métodos convencionais, incluindo flexibilidade quase ilimitada e controlabilidade, especialmente na estrutura porosa. Salientou que a técnica não se limita aos tubos de calor de alumínio e pode ser empregada para fabricação de outros tipos de tubos, já que outros materiais, como o aço inoxidável e o titânio, também são materiais empregados no processo SLM. O autor salientou ainda que o novo método de produção de tubos de calor tem um longo caminho antes de serem totalmente caracterizados e qualificados, especialmente para aplicações críticas. Na Figura 15 é possível observar um protótipo de tubo de calor feito com técnica SLM usando alumínio.

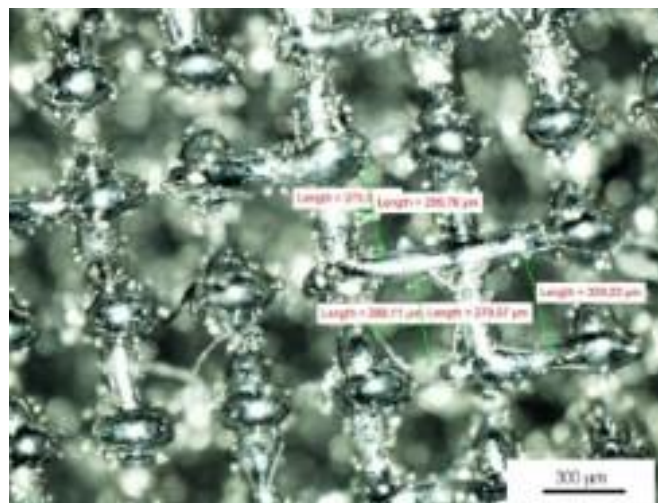
Figura 15 Estrutura porosa fabricada em alumínio a partir de técnica SLM



Fonte: Masoud (2012)

Masoud (20012. utilizaram a tecnologia de impressão 3D conhecida como SLM para a fabricação da estrutura capilar de um tubo de calor em circuito. Segundo os autores, a vantagem dessa técnica é que ela controla o tamanho geométrico das passagens internas do elemento poroso, visando obter um projeto ideal de acordo com os requisitos especificados. O estudo de caso aborda uma análise exaustiva das melhorias, em termos de fluido de trabalho selecionado e o modo de fabricação da estrutura porosa através do uso de uma nova técnica, onde uma condição restritiva na temperatura máxima do fluido foi imposta em comparação com outros tubos de calor de características semelhantes (ver Figura 16).

Figura 16 Estrutura porosa fabrica em titânio a partir de técnica SLM



Fonte: Masoud (2012)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado os procedimentos analíticos e experimentais envolvidos na confecção de meios porosos para tubos de calor. Primeiramente foi realizado um estudo para a caracterização do material que será empregado nos tubos de calor, depois foi feita a simulação analítica do experimento e por últimos os testes em bancada experimental que foram comparados com resultados anteriores.

Este trabalho foi executado pelo laboratório T2F (*Thermal Fluid Flow*) em parceria com o Senai Joinville. A fabricação de corpos de prova para ensaios, dos meios porosos a realização das caracterizações, foi realizada utilizando as estruturas físicas dos dois laboratórios. O pó metálico de titânio foi adquirido do Senai-SC.

3.1 PÓ DE TITANIO

Os tipos de materiais que podem ser processados utilizando a técnica SLM incluem os aços inoxidáveis, aços ferramenta, ligas cobalto-cromo, titânio, alumínio, entre outros materiais metálicos, neste trabalho iremos utilizar o pó de titânio. Todos devem ser transformados em pó com formato esférico e devem exibir certas características de escoamento (FISCHER et al., 2003). Ligas com elevados teores de carbono quando aquecidas e resfriadas rapidamente, como ocorre no processo SLM, sofrem um fenômeno de pré-têmpera conforme as camadas são fabricadas, gerando tensões internas muito elevadas que resultam em trincas. Neste contexto, procura-se substituir estes materiais por ligas com baixos teores de carbono.

3.2 CORPOS DE PROVA FABRICADOS ATRAVÉS DE SLM

Para realização dos ensaios de medição de porosidade, permeabilidade e extrusão capilar foram confeccionadas 16 amostras de estrutura porosa de titânio, sendo que para cada amostra uma metodologia de sinterização diferente foi empregada. Os parâmetros foram pré-definidos pelo Senai SC a fim de testarem diversas maneiras onde o laser poderia atuar, gerando amostras com diâmetros e porosidades diferentes. As amostras possuíam o formato cilíndrico e dimensões com aproximadamente 21 mm de comprimento e 19 mm de diâmetro ver Figura 17, essas dimensões foram pré definidas pelo SENAI Joinville devido as restrições físicas da

maquina se fusão a laser e para ser fácil a obtenção da caracterização do meio poroso na bancada de teste como será mostrado mais adiante.

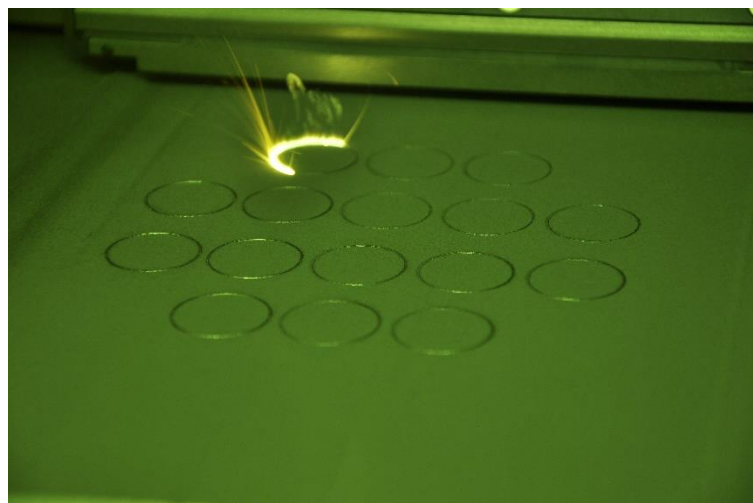
Figura 17 Amostras feitas pelo Senai



Fonte: Autor (2018).

Como é possível observar na Figura 17, cada amostra tem um código diferente que se refere a um tipo de configuração do laser na máquina, gerando diversos parâmetros diferentes para se analisar. Na Figura 18 é mostrado como o laser atua na fabricação da amostra.

Figura 18 Processos de fabricação das amostras



Fonte: Autor (2018).

Na tabela 4, pode se ver os parâmetros que foram variados nas 16 amostras, onde

- A potência do laser (*laser power*) é a energia por unidade de tempo aportada no leito de pó metálico para a fabricação das peças;

- A velocidade de varredura (*scanning speed*) é a velocidade que o foco do laser percorre o leito de pó metálico para a fusão seletiva do material;
- A espessura de camada (*layer thickness*) é a espessura das camadas de pó metálico depositadas ao longo da fabricação;
- O *hatching distance* é a distância entre cada vetor da trajetória desenhada pelo feixe de laser sobre o pó metálico.

Tabela 4 Parâmetros variados na SLM

Amostra	Potência do laser (w)	Velocidade de varredura (mm/s)	Espessura de camada (µm)	Hatching distance (µm)
A1	275	1100	60	120
A2	275	1100	90	120
A3	275	1100	60	140
A4	275	1100	90	140
A5	275	1100	60	160
A6	275	1100	90	160
A7	275	1100	60	160
A8	275	1100	90	120
B1	200	900	60	120
B2	200	900	90	140
B3	200	900	60	140
B4	200	900	90	160
B5	200	900	60	160
B6	200	900	90	160
B7	200	900	60	180
B8	200	900	90	180

Fonte: Senai (2018)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Como o objetivo de caracterizar os meios porosos fabricados através da técnica SLM foram realizadas as seguintes medições: medição de porosidade, medição de permeabilidade e medição de raio crítico de poro.

3.3.1 Medição da porosidade

Para medição da porosidade, podem-se utilizar diferentes métodos, como o princípio de Arquimedes, método geométrico, porosimetria por intrusão de mercúrio, inibição dentre outros. Neste trabalho, para obter-se os valores de porosidade das estruturas capilares, foi utilizado o método da imersão.

A norma MIL-STD-276A descreve um método para medição da densidade de meios porosos com poros comunicantes, por meio da medição da massa primeiramente ao ar e depois com a amostra totalmente preenchida de líquido, para posteriormente calcular-se sua densidade. É aconselhado, na realização desta caracterização, que a amostra possua uma massa mínima de 5 gramas.

Para a execução do experimento, primeiramente mediu-se a massa da amostra totalmente seca, como é mostrado na Figura 19, pois era necessário saber se havia muita diferença entre o peso antes e depois de secarmos na estufa.. Após esse procedimento as amostras foram submetidas a temperatura de 125°C por cerca de 2 horas a fim de garantir que elas estejam totalmente secas.

Figura 19 Amostras sendo secas antes da imersão na câmara de vácuo



Fonte: Autor (2018).

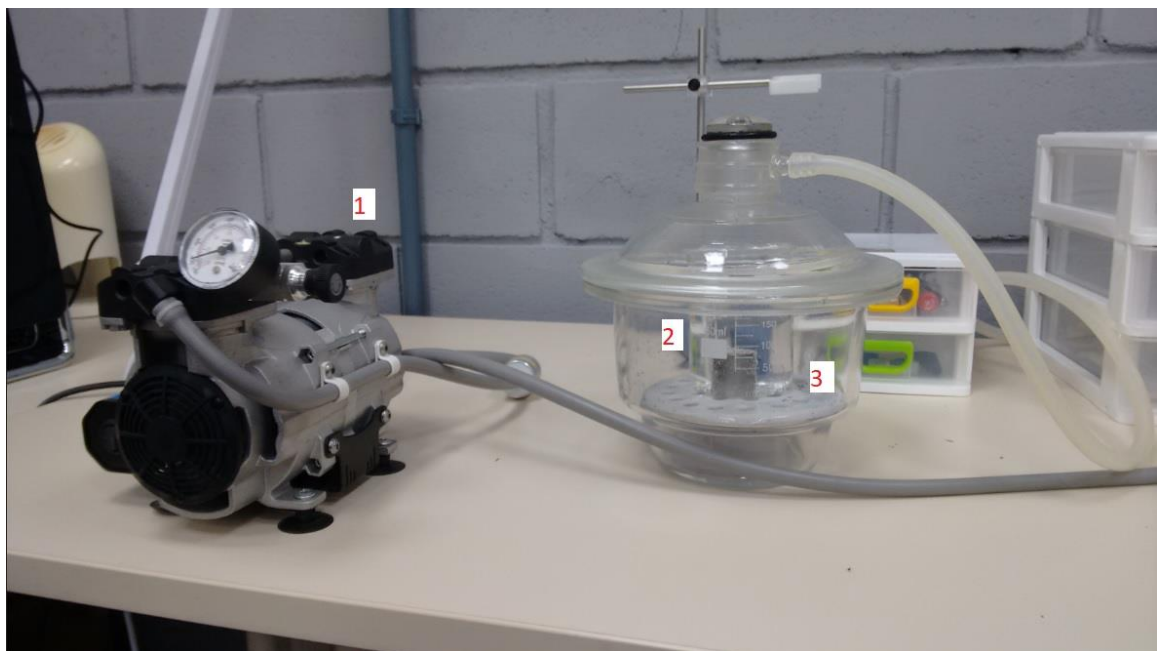
Após a secagem, cada amostra foi imersa em água e colocada dentro de uma câmara de vácuo. Com a redução da pressão no exterior do corpo, a água pode penetrar completamente em todos os poros da amostra, esse processo é mostrado nas Figura 20 e Figura 21.

Figura 20 amostra dentro da câmara de vácuo



Fonte: Autor (2018).

Figura 21 Componentes da câmara de vácuo, (1) Bomba de vácuo, (2) Câmara de vácuo e (3) Becker com a amostra imersa em água.



Fonte: Autor (2018).

A porosidade é calculada pela equação abaixo

$$Porosidade\ total = 100\% \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \quad (7)$$

onde:

ρ_a é a densidade da amostra em Kg/m³

ρ_s é a densidade do material da amostra em Kg/m³

A porosidade efetiva é calculada pela equação abaixo

$$Porosidade\ Efetiva = 100\% \cdot \left(\frac{V_p}{V_a}\right) \quad (8)$$

onde

$$V_p = \frac{m_m - m_s}{\rho_l} \quad (9)$$

onde:

m_m a massa molhada da amostra em Kg

m_s a massa seca da amostra em Kg

ρ_l a densidade do liquido em Kg/m³

Utilizando a Equação 8 com os pesos medidos das amostras seca e molhada obtivemos a porosidade efetiva.

3.3.2 Medição de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade gasosa fornece como resultado o valor das constantes de permeabilidade, e consiste em verificar a perda de carga causada no fluxo de um gás ao passar por uma estrutura porosa. Para isto construiu-se um aparato, no qual se conseguiu medir os valores de pressão antes e depois da amostra, além do valor de vazão do fluido utilizado. Na Figura 22 pode se observar uma das amostras utilizadas no experimento.

Figura 22 Amostra utilizada no experimento



Fonte: Autor 2018

A bancada experimental utilizada para a caracterização das amostras pode ser observada na Figura 23, sendo que, a mesma é constituída por um cilindro de argônio, mangueiras, um medidor de vazão e um medidor de pressão diferencial. As amostras foram colocadas dentro de um tubo PVC e envolvidas com o-rings a fim de que quando apertadas contra o tubo não permitisse a passagem do fluido pelas laterais como é mostrado na Figura 24.

Figura 23 Bancada experimental para testes de medição de permeabilidade. (1) Regulador de Pressão argônio, (2) Transdutor de pressão diferencial (0-15 psi), (3) Regulador de Vazão, (4) Computador para aquisição de dados, (5) Medidor de vazão



Fonte: Autor 2018

Figura 24 Bancada experimental (1) Amostra dentro do tubo, (2) Tomada de pressão antes da amostra, (3) Tomada da pressão depois da amostra, (4) Transdutor de pressão diferencial.



Fonte: Autor 2018

O teste foi realizado liberando-se o argônio do cilindro a uma pressão constante e controlada por uma válvula limitadora de vazão, sendo o fluxo de gás conduzido por mangueiras até a amostra. Antes e depois da amostra se encontram as tomadas de pressão do transdutor de pressão diferencial utilizado (Omega, modelo PX409015DWUI-EH). Este executa a leitura da diferença de pressão e transmite o sinal para um sistema de aquisições de dados (foi utilizado equipamento da marca *National Instruments* DAQ-9178). Após o fluido passar pelas amostras e pelas tomadas de pressão, o fluxo é conduzido até um dispositivo medidor de vazão como mostra a Figura 25, o qual permitiu medir a vazão do fluido.

Figura 25 Medidor de Vazão utilizado

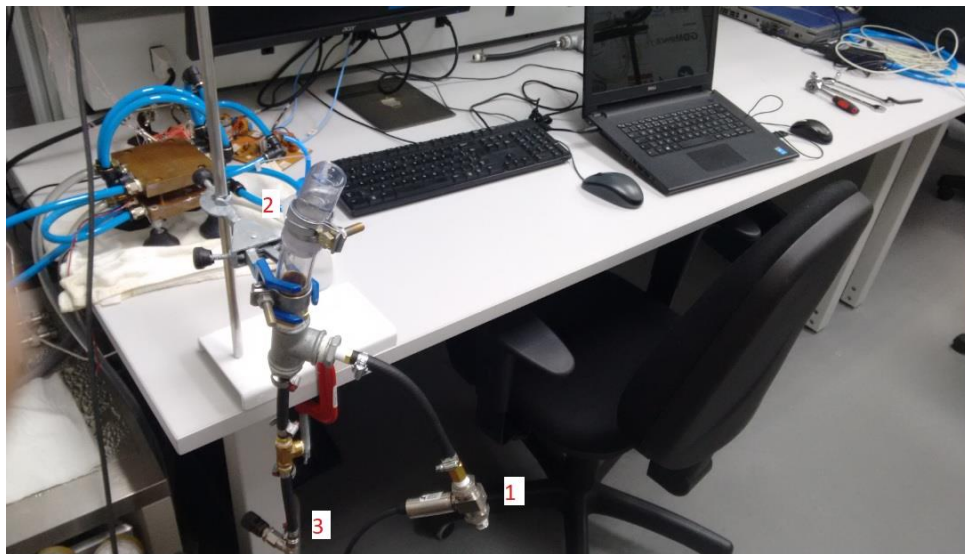


Fonte Autor (2018).

3.3.3 Medição do raio Crítico

A medição do raio crítico está fortemente ligada com a medição da pressão capilar das estruturas porosas, cuja a determinação é fundamental para obtenção da perda de carga na seção porosa do material. Realizou-se a medição do raio crítico por meio de um ensaio de extrusão capilar, onde se inseriu gás sob pressão em um dos lados da amostra, saturada com um líquido, verificando-se o surgimento de bolhas na face superior oposta. Para isto, construiu-se um aparato para medição do raio crítico de poro, com base em uma bancada experimental descrita pela norma ASTM-E128-99. Na Figura 26, pode-se observar a bancada experimental utilizada para este ensaio.

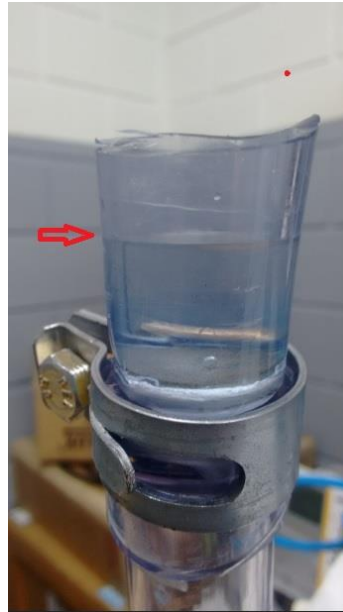
Figura 26 Bancada experimental para determinação do raio crítico, (1) Transdutor de pressão, (2) Porta Amostra e (3) Controlador de vazão



Fonte (Autor, 2018)

Para a realização do ensaio, utilizou-se um circuito composto por tubos, mangueiras, transdutor de pressão, um sistema de aquisição de dados e uma porta amostras, onde a amostra possuía uma coluna de água de 25 mm como mostra a Figura 27. Durante o ensaio, aumentou-se a pressão no circuito lentamente, até que se formasse a primeira nucleação de bolha visível, quando então, registrou-se o valor de pressão. O experimento foi repetido 20 vezes em cada amostra para se garantir a repetibilidade.

Figura 27 Nucleação da bolha e coluna de água



Fonte (Autor, 2018)

Com o valor de pressão obtido durante o ensaio, foi possível calcular o raio crítico do poro, por meio da equação 10

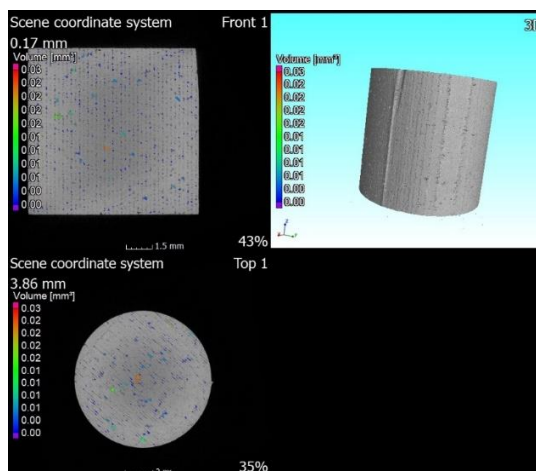
$$r_c = 2 \frac{\sigma \cos \alpha}{P - \rho_l g h} \quad (10)$$

onde (r_c) é o valor do raio crítico, (σ) é o valor da tensão superficial da água na temperatura de 295K (22 °C) medida durante o ensaio, (α) é o ângulo de contato e tem o valor de 1, pois assume um perfeito molhamento, (P) é o valor de pressão aplicado para a nucleação da primeira bolha, (ρ_l) é a densidade do líquido, no caso água, (g) é a constante gravitacional padrão e (h) a altura da coluna de líquido, que é de 25 mm.

3.3.4 Metalografia

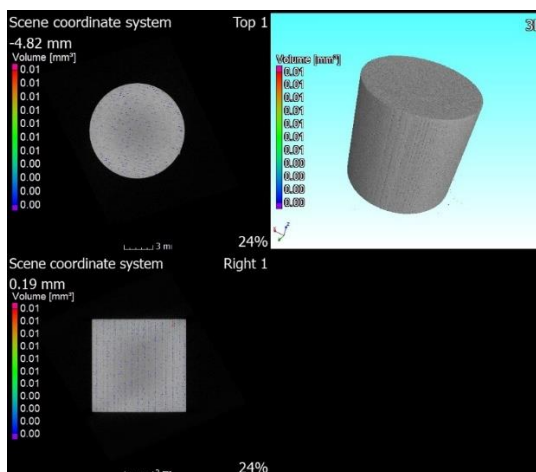
Para realização da análise tomográfica de três amostras produzidas por manufatura aditiva foi utilizado um tomógrafo da Fundação CERTI da UFSC. O objetivo dessa análise foi avaliar a porosidade do elemento poroso utilizando a técnica de tomografia e compara-la com a porosidade obtida pelo método de Arquimedes citado anteriormente. Nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30, é possível visualizar o resultado da análise para as amostras B6, B7 e B8, respectivamente. Foram escolhidas essas três amostras, pois no método da permeabilidade foram as que apresentaram melhores valores.

Figura 28 Amostra B6



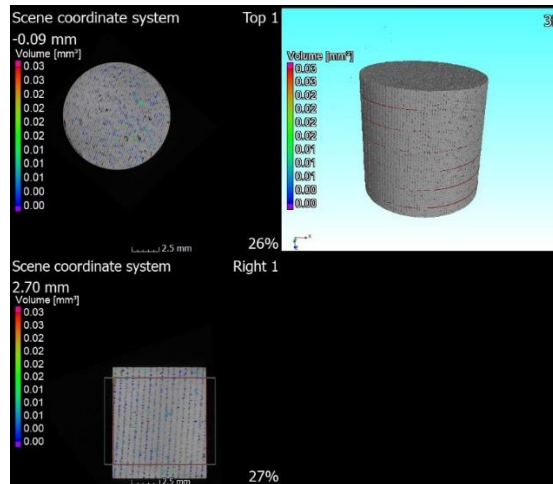
Fonte Autor 2018

Figura 29 Amostra B7



Fonte Autor 2018

Figura 30 Amostra B8



Fonte Autor 2018

3.4 MODELO ANALÍTICO

Basicamente para que um tubo de calor funcione, o fluido que sai do evaporador deve chegar até o condensador e depois retornar, porém para que isso ocorra existem algumas limitações de projeto que precisam ser cuidadas. Essa seção irá tratar do equacionamento necessário para que o princípio básico de funcionamento ocorra. Todas as equações apresentadas nessa seção foram extraídas das seguintes literaturas Reay & Kew (2006), Chi (1976) e Faghri (1995).

Para que o fluido circule no interior de um tubo de calor é necessário que a força capilar exceda todas as outras forças opostas que atuam nos fluidos. Existem três forças opostas, a queda de pressão do líquido devido a fricção dentro da camada porosa, o gradiente de pressão do vapor que faz com que o vapor flua para o condensador e finalmente a gravitacional que pode ser a favor ou contra a gravidade. A equação abaixo mostra esses valores

$$\Delta P_{c,max} \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (11)$$

onde:

$\Delta P_{c,max}$ é a máxima pressão capilar em Pa;

ΔP_l : é a perda de pressão do líquido para sair do condensador e chegar no evaporador em Pa

ΔP_v : é a perda de pressão do vapor para sair do evaporador e chegar no condensador em Pa

ΔP_g é a perda de carga devido a força gravitacional e ela pode ser neutra, positiva ou negativa dependendo do posicionamento do tubo.

O resultado da equação acima estabelece o limite capilar do tubo e está indicado na Figura 31. Normalmente, o limite capilar determinará a fluxo de calor máximo em grande parte das faixas de operação, mas existem outros limites que podem restringir o desempenho do tubo de calor em condições especiais. Alguns deles são:

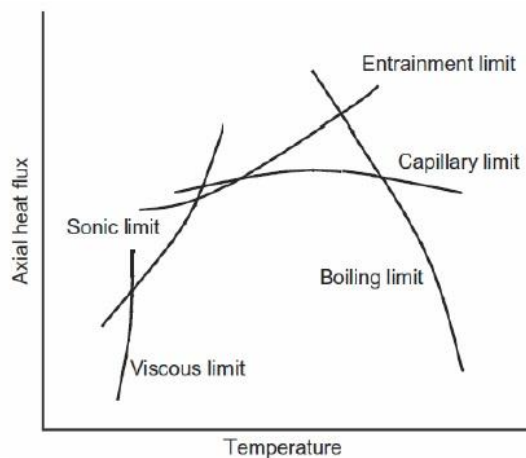
Limite viscoso: normalmente acontece no início do evaporador quando o gradiente de pressão de vapor ao longo do tubo não é o suficiente para superar o viscoso;

Limite de sônicos: ocorre principalmente durante o arranque quando a velocidade do vapor se aproxima da sônica e faz com que o fluxo de vapor gere choque.

Limite de Atrito: Ocorre quando o vapor atinge uma velocidade muito alta e arraste o líquido da região capilar no sentido oposto ao condensador.

Limite de ebulição: Ocorre quando a taxa de calor que entra dentro do tubo é muito grande fazendo com que o vapor fique pressurizado na região mais externa do tubo causando um isolamento interno e interfira na transmissão de calor.

Figura 31 Fluxo de calor Axial X Temperatura



Fonte: Mantelli (2006).

O limite capilar, em geral, é o mais restritivo e devido a esse fato tem maior importância no projeto de tubos de calor. Os outros limites dependem de situações bem específicas que no nosso caso não irão interferir, segue abaixo as equações para o limite capilar.

$$\Delta P_{c,max} = 2\sigma_l \frac{\cos \theta}{r_c} \quad (12)$$

onde:

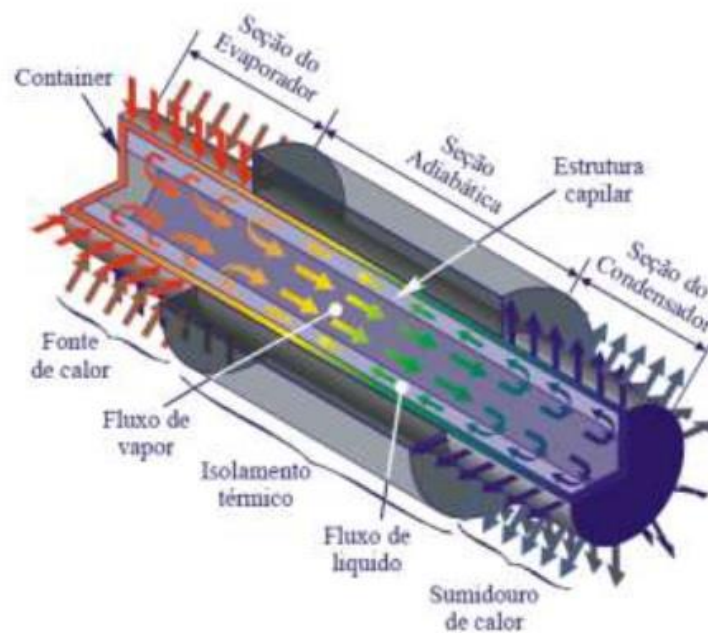
r_c : é o raio efetivo do poro em m.

θ : é o ângulo de contato do sólido com o líquido.

σ_l : Tensão superficial do líquido em N/m.

Assumindo um escoamento laminar do líquido dentro da estrutura porosa, uma taxa de evaporação e condensação por unidade de comprimento constante e uma camada porosa homogênea chegamos na Equação 13. Para tubos cilíndricos Figura 32 tem-se:

Figura 32 Modelo do tubo de calor



Fonte Mantelli (2006)

$$\Delta P_l = \frac{8\mu_l \dot{Q} L_{eff}}{\pi(r_w^2 - r_v^2) \epsilon r_c^2 \rho_l L} \quad (13)$$

onde;

Comprimento efetivo $L_{eff} = \frac{1}{2}(L_c + L_e) + L_a$ em m

L_e : comprimento da seção do evaporador em m.

L_c : comprimento da seção do condensador em m.

L_a : comprimento da seção adiabática em m.

μ_l : Viscosidade dinâmica do fluido em Pa. s

Q : Fluxo de calor em W

ρ_l : Densidade do líquido em Kg/m³

L : Calor latente de vaporização em J/Kg

ε : Porosidade

r_w : Raio interno da parede do tubo em m

r_v : Raio do canal de vapor no tubo em m

Para a queda de pressão de vapor, em regime permanente, a taxa de fluxo de massa do vapor é igual a taxa de fluxo de massa de líquido na mesma posição axial. No entanto, por causa da baixa densidade do vapor em comparação com a do líquido, a sua queda de pressão pode ser devida ao atrito por fricção ou por efeitos dinâmicos. Assim, o escoamento de vapor pode ser laminar ou turbulento. Assumindo um escoamento incompressível de vapor, ou seja, um baixo gradiente de pressão se comparado à sua pressão média no tubo e um escoamento laminar totalmente desenvolvido do vapor. Sendo assim a equação 14 fica:

$$\Delta P_v = \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right) \frac{\dot{m}^2}{8r_v^4 \rho_v} + 8 \frac{\dot{m} \mu_v L_a}{\pi \rho_v r_v^4} \quad (14)$$

onde:

ρ_v : Densidade do vapor em Kg/m³

μ_v : Viscosidade dinâmica do vapor em Pa. s

A fórmula do gradiente gravitacional é dado pela equação 15, abaixo:

$$\Delta P_g = \rho_l g l \sin \varphi \quad (15)$$

onde:

g : aceleração da gravidade em m/s²

l : comprimento total do tubo de calor em m

φ : Ângulo entre a horizontal e o tubo de calor, é positivo quando o condensador está abaixo do evaporador e negativo se for ao contrário.

Quando o calor é aplicado ao evaporador, ele é conduzido através da parede do tubo e, em seguida, o líquido se propaga no meio poroso, principalmente por condução, através do sólido e em parte por convecção através do líquido e atinge a superfície do líquido que é a interface vapor-líquido-sólido. Ao aumentar gradualmente o calor, o mesmo processo acontece, porém mais calor é transferido por mudança de fase dentro do tubo. Depois de algum tempo, as bolhas começam a se formar na parede do tubo de calor e as primeira bolhas facilmente deixam a parede e se propagam até a superfície, o que aumenta a convecção. Aumentando o calor ainda mais, chega um ponto em que as bolhas cobrem toda a superfície da parede interna do tubo de calor no evaporador e bloqueiam a transferência de calor para o tubo. Este ponto é chamado de burn-out onde a temperatura do evaporador é muito alta e o calor não é mais transferido pelo tubo. Por isso, é importante conhecer a condutividade térmica efetiva de uma estrutura porosa. Para calcular isso, existem dois modelos na literatura; um modelo assume que o líquido e a estrutura porosa estão efetivamente em paralelo e o outro modelo sugere que os dois estão em série, esse ultimo será abordado nesse trabalho.

Algumas correlações tem sido desenvolvidas para certos tipos de estruturas porosas, a condutividade térmica em estruturas porosas no formato de pacote de esferas é mostrado na equação 16.

$$K_w = \frac{K_l[(2K_l+K_s)-2(1-\varepsilon)(K_l-K_s)]}{[(2K_l+K_s)-2(1-\varepsilon)(K_l-K_w)]} \quad (16)$$

onde;

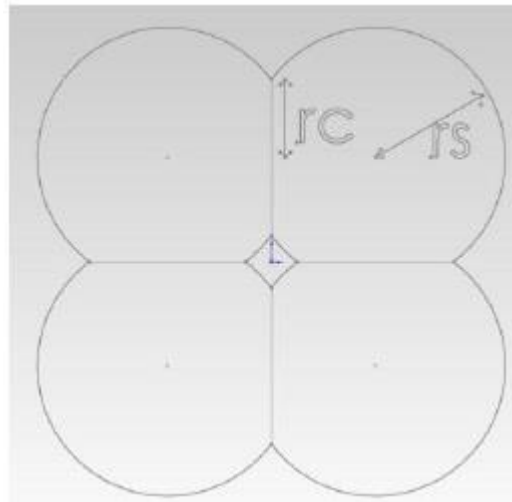
K_w : é a condutividade térmica efetiva do meio poroso em W/mK

K_l : é a condutividade térmica do fluido em W/mK

K_s : é a condutividade térmica do material poroso em W/mK

Na Figura 33 é mostrado o empacotamento teórico do pó sintetizado, se nota que conforme aumenta a área de contato entre as esferas mais a teoria de esferas empacotadas se distorce nós usaremos uma aproximação que o R_c (raio crítico) é igual a R_s (raio da esfera).

Figura 33 Modelo de esferas empacotadas



Fonte: Masoud (2012)

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das caracterizações das amostras e os resultados analíticos do modelo experimental.

4.1 MEDIÇÃO DA POROSIDADE

Na Tabela 5, pode-se observar as médias das medidas de porosidade, obtidas pelo método da imersão e utilizando a Equação 9. Foram utilizados valores de porosidade de três amostras, pois as demais não apresentaram vazão suficiente no teste da permeabilidade, logo foram descartadas.

Tabela 5 Resultados da porosidade das amostras

Amostras	Peso Seco (kg)	Peso Molhado (kg)	Vol. Poro (m ³)	Porosidade (%)
B6	3,612E-02	3,647E-02	3,480E-07	4,01
B7	3,624E-02	3,656E-02	3,209E-07	3,70
B8	3,490E-02	3,548E-02	5,776E-07	6,66

Fonte Autor 2018

Os valores das porosidades, segundo a Maydanik (2004), em se tratando de titânio devem ficar entre 55-70 %, logo essas amostras não são apropriadas para a fabricação de tubos de calor. Na Tabela 6 pode ser visto os resultados totais das porosidades obtidas através de análise tomográfica. Percebe-se que os valores estão na mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos por imersão. Comparando os valores obtidos pelas duas técnicas com os apresentados por Maydanik (2004) pode-se concluir que a porosidade das estruturas produzidas por SLM estão muito abaixo do ideal. Novas condições precisam ser testadas para aumentar o valor desse parâmetro.

Tabela 6 Porosidade das amostras encontradas pela tomografia

Amostras	Porosidade (%)
B6	3,48
B7	2,57
B8	4,68

Fonte Autor (2018).

4.2 MEDIÇÃO DO RAIOS CRÍTICO

A média obtida dos diâmetros críticos, das amostras testadas pelo método da extrusão capilar segundo a norma ASTM-E128-99 juntamente com seus respectivos desvios padrão encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 Diâmetro Crítico e Pressão capilar

Amostra	B6	B7	B8
Diâmetro crítico (μm)	53,9 \pm 8,1	46,6 \pm 3,3	79,8 \pm 10,1
Pressão Capilar (kPa)	5,76	6,51	3,96

Foram testadas três amostras, sendo que se mediu 20 vezes cada amostra para verificar a repetibilidade dos valores de pressão capilar. Observou-se uma relação inversamente proporcional entre os valores de pressão capilar e raio crítico dos poros como mostrado na Tabela 7. Segundo Maydanik (2004), o valor ideal de diâmetro crítico seria entre 6-20 μm , porém se utilizarmos os valores obtidos na tabela 7 na equação de Blake-Kozeny mostrada abaixo, iremos obter uma permeabilidade na mesma ordem de grandeza que a mencionada por Maydanik (2004). Logo esse diâmetro pode ser considerado como razoável para uma primeira análise.

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150(1 - \varepsilon)^3}$$

Onde

d_p é o diâmetro do poro.

ε é a porosidade da amostra.

K é a permeabilidade do meio poroso.

4.3 MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE

Na Figura 34, pode-se observar um gráfico da perda de carga em função da velocidade do fluxo de argônio, para as diferentes estruturas porosas. A amostra B8 apresentou os valores mais elevados de perda de carga se comparada com as outras duas amostras para uma mesma

velocidade. A amostra B6 apresentou os menores valores de perda de carga. O comportamento das curvas dos três tipos de estrutura é praticamente linear, identificando-se, desta forma, a validade da equação de Darcy, que é a relação linear existente entre a queda de pressão e a velocidade do fluido passante pelo meio poroso, segundo Nuremberg (2009, p 78). Foram realizadas entre cinco e oito medidas de pressão diferencial e de vazão em cada tipo de estrutura porosa para se poder calcular o coeficiente de permeabilidade.

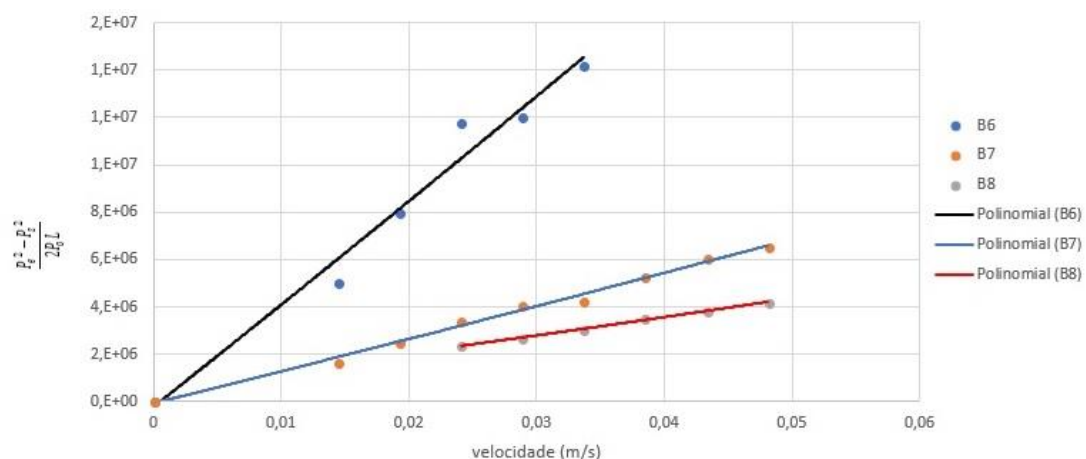
Na tabela 8 encontramos os valores de permeabilidade usando o método experimental de Forcheimer e Darcy juntamente com o método analítico de Blake-Kozeny. Verificou-se um maior valor de permeabilidade para a amostra B7. Os valores de permeabilidade encontrados nas amostras estão na mesma ordem de grandeza dos valores citados por (Maydanik,2004), para tubos de calor feito em Titânio.

Tabela 8 Permeabilidade das amostras

Amostras	Experimental			Teórico
	Forcheimer		Darcy	Blake-Koseny
	K1 (m2)	K2 (m2)	K (m2)	K(m2)
B6	5,24689E-14	5,52567E-09	5,43086E-14	3,12E-14
B7	1,68281E-13	1,61006E-08	1,6979E-13	1,99E-14
B8	3,40593E-13	1,0187E-08	2,48828E-13	1,89E-13

Fonte Autor (2018).

Figura 34 Gráfico da perda de carga em função da velocidade para cada amostra.



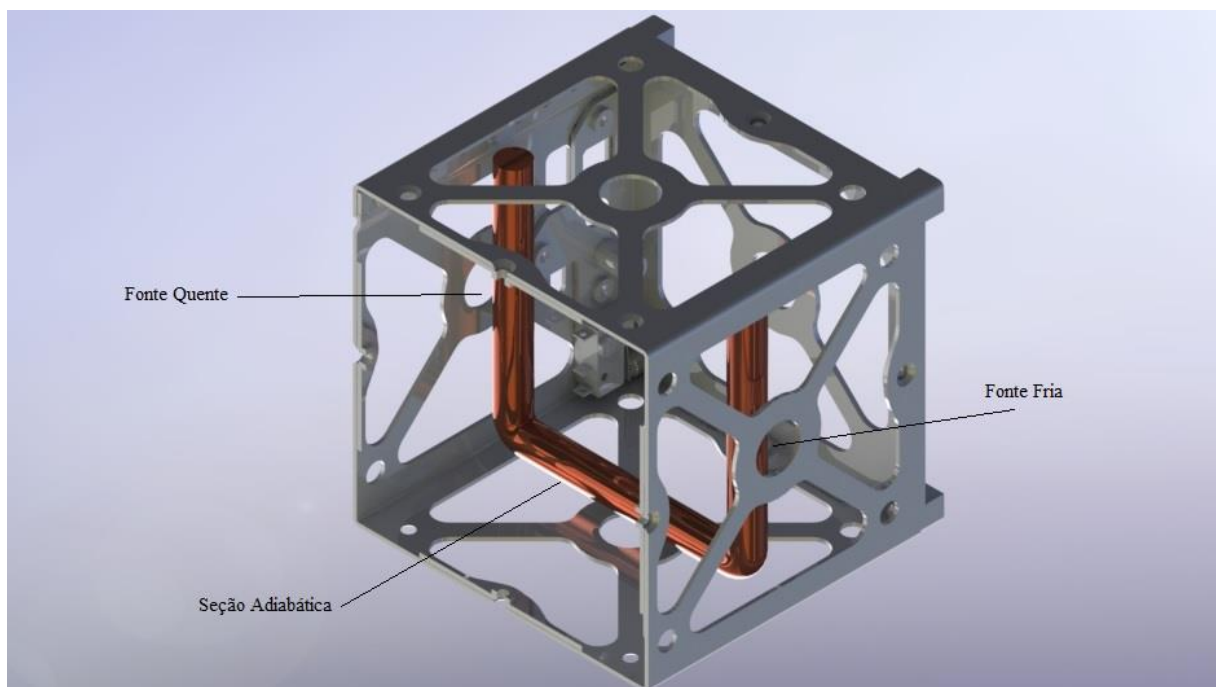
Fonte Autor (2018).

4.4 RESULTADOS TEÓRICOS

Para poder projetar um tubo de calor é necessário que seja testado analiticamente algumas configurações variando certos parâmetros, como será mostrado a seguir. Foi usado um código em EES (Engenier Equation Solver) como é mostrado no Apêndice A. A ideia inicial é projetar um tubo de calor que pudesse ser empregado dentro de um CubSat. Primeiramente definimos alguns parâmetros iniciais que a própria limitação física interna do Cubsat fornece na Figura 36 é mostrado um esboço do tubo no interior do Cubesat:

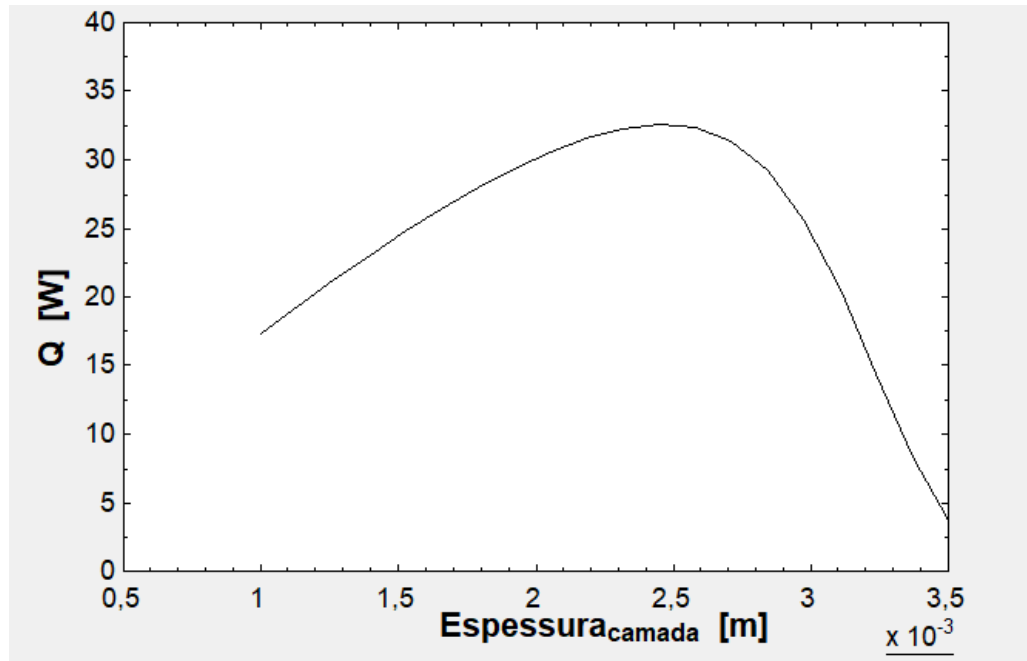
- Comprimento da parte adiabática de 100 mm
- Comprimento do evaporador 100 mm.
- Comprimento do condensador 100 mm.
- Diâmetro externo de 10 mm.
- Material Titânio
- Temperatura de operação 40 ° C
- Espessura da parede do tubo de 1 mm.

Figura 35 Cad com o Tubo no Cubesat



Na escolha da espessura da camada porosa foram inseridos os parâmetros acima e variado a espessura como mostra a Figura 36. Com isso foi possível obter uma espessura ideal que de acordo com o modelo seria aproximadamente 2,5 mm.

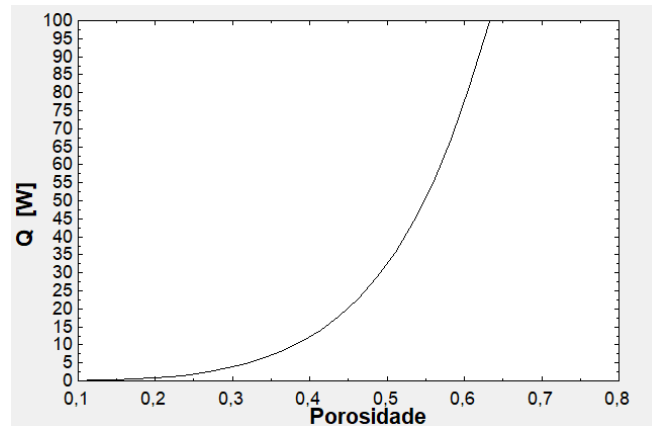
Figura 36 Espessura X Fluxo de Calor



Fonte Autor (2018).

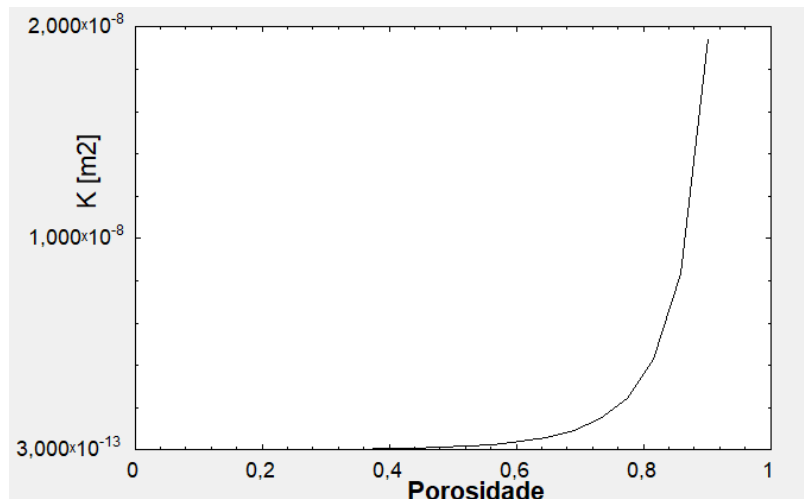
Outro fator que podemos analisar é a transferência de calor variando com a porosidade. Na Figura 37 vemos que quando esse valor é superior a 50%, há um crescimento abrupto, porém com o aumento da porosidade a permeabilidade térmica do material também aumenta como pode ser visto na Figura 38. Segundo Maydanik 2008 os tubos de calor feitos com titânio apresentam uma permeabilidade na casa de $10^{-13} m^2$, logo uma porosidade em torno de 50% pode ser considerada satisfatória para um projeto preliminar.

Figura 37 Variação da taxa de calor com a porosidade



Fonte Autor 2018

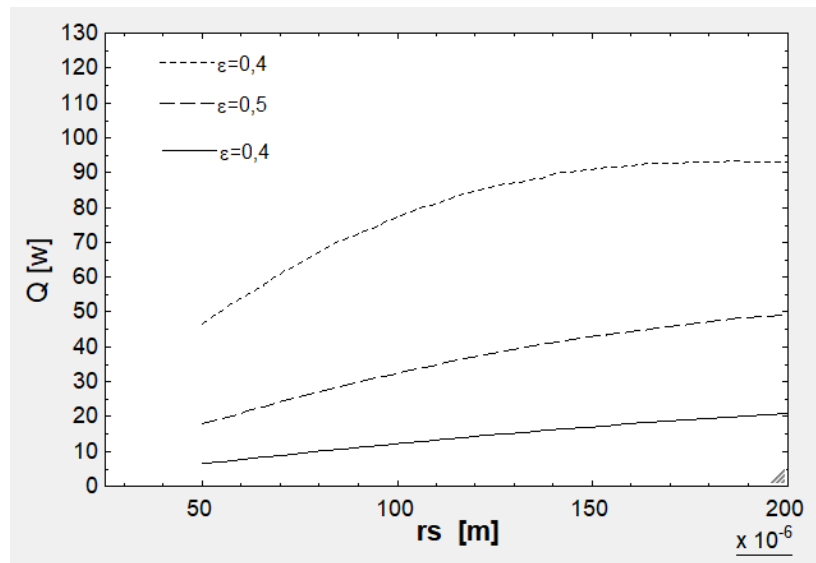
Figura 38 Variação da permeabilidade com a porosidade



Fonte Autor 2018

Para iniciar a manufatura do tubo de calor é preciso selecionar um tamanho ideal para o raio do poro. Na Figura 39 verificamos que o aumento do raio cresce proporcionalmente a taxa de transferência de calor. A porosidade, ϵ , variou entre 0,4 e 0,6 e percebe-se que o aumento da mesma ajuda na transferência de calor, porém como foi apresentado anteriormente uma porosidade acima de 50% acarreta em um aumento na permeabilidade o que não seria ideal no nosso caso.

Figura 39 Influencia do raio médio da partícula e da porosidade sobre a máxima capacidade de transporte de calor



Fonte Autor 2018

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso, foi realizado uma avaliação inicial da fabricação de meios porosos de titânio em um processo SLM para futuras aplicações em tubos de calor para nanossatélites. A parceria com o Senai-Joinville foi importante para analisarmos as dificuldades encontradas nesse processo de fabricação que ainda é pouco difundido no Brasil. Foi elaborado um modelo analítico simplificado sobre o desempenho de tubos de calor, bem como listados os fenômenos que regem o funcionamento destes. As seleções de algumas características para o desenvolvimento das estruturas porosas, como valores de porosidade, permeabilidade e raio de poro, foram orientadas a partir desses estudos.

Foi desenvolvido com sucesso uma bancada em escala laboratorial para a caracterização da estrutura porosa, junto com o processo de fabricação em SLM. Ao todo foram produzidas 16 amostras para a realização dos testes de caracterização, sendo que 3 obtiveram valores factíveis de permeabilidade e raio de poro porem a porosidade de nenhuma delas chegou em valores razoáveis para serem empregadas em tubos de calor. Os resultados obtidos com as caracterizações indicaram que a amostra B8 foi uma das melhores nesses quesitos, porém sua porosidade ainda está muito baixa para aplicações em tubos de calor. Todavia, com base nos resultados das caracterizações realizadas sugere-se que o ideal seria mantermos a permeabilidade e o raio de poro da amostra B8, porém aumentando sua porosidade através de novos parâmetros de impressão SLM. Como foi mostrado na parte de otimização de um tubo de calor, seria possível a fabricação de um tubo de calor usando os parâmetros da B8 porem supondo uma porosidade em torno de 50%.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerido:

- Fabricação de alguns protótipos de tubos de calor com os parâmetros apresentados no modelo analítico
- Melhorar a manufatura aditiva obtendo raio crítico menor e porosidade maior,
- Realizar teste em uma bancada de banho térmico imputando valores que correspondem aos que seriam usados em uma missão real no Cubsat.

REFERÊNCIAS

ABE, F.; OSAKADA, K.; SHIOMI, M.; UEMATSU, K.; MATSUMOTO, M. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 111, p. 210-213, 2001.

ANGELO, W. B. **Caracterização Térmica de um Termossifão Bifásico de Naftaleno**. UFSC – Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2008.

AKBARZADEH, A.; WADOWSKI, T.. Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 16, n. 1, p.81-87,j an. 1996. Elsevier BV.

BADROSSAMAY, M.; CHILDS, T. H. C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders. *Inter. Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 47, p. 779-784, 2007

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002.

CHEN Y. M.; WU S. C.; CHU C. I. Thermal performance of sintered miniature heat pipes, **Heat and Mass Transfer**, n. 37, p. 611-616, 2001.

CHI, S. W. **Heat pipe theory and practice**. NY: Press 1976.

CHILDS, T.H.C.; HAUSER, C.; BADROSSAMAY, M. Mapping and modelling single scan track formation in direct metal selective laser melting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 53, i. 1, p. 191-194, 2004.

FAGHRI, A. **Heat pipe science and technology**. Washington D.C: Taylor & Francis, 1995.

FISCHER, P. et al. Sintering of commercially pure titanium powder with a Nd. **YAG laser source**. v. 51, n. 6, p. 1651-1662, 2003

GILMORE, David G.. **Spacecraft Thermal Control Handbook**. El Segundo, California: The Aerospace Corporation Press, 2002.

INNOCENTINI M.; PANDOLFELLI, V. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica**, v. 45, 1999.

ISAACS, S., et al. Experimental Development and Computational Optimization of Flat Heat Pipes for CubeSat Applications. **Journal of Electronic Packaging** v.139.2, 2017.

KRUTH, J. P.; LEU, M. C.; NAKAGAWA, T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 47, i. 2, p. 525-540, 1998.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. *Cerâmica*, v. 54, n. 330, p. 174-184. 2008

MANTELLI, M.B.H. [Notas de aula da disciplina de Tubos de calor e termossifões], Florianópolis, 2006. Digitalizado.

MASOUD AMELI, S. Additive layer manufactured sinter-style aluminium/ammonia heat pipes. *Applied Thermal Engineering* 2012

MAYDANIK, Y. F. Loop Heat Pipes, *Applied Thermal Engineering*, set. 2004.

MOHARRAM, K.A. et al. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 4, n. 4, p. 869-877, dez. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.005>> Acesso em: 25 abr. 2017.

NUERNBERG, G. G. V. **Desenvolvimento de meios porosos metálicos para utilização em tubos de calor**. 2009. xx p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAIVA, K. V. **Minitubos de calor híbridos para controle térmico de componentes eletrônicos**. 2009. Xx p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

POPOVICI C. G. et al. Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Using Air Cooled. Heat Sinks. *Energy Procedia*, v. 85, p. 425-432, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.223>> Acesso em: 20 maio 2017.

REAY, D.; KEW, P. **Heat pipes: Theory, design and applications**, 5. ed. Butterworth-Heinemann. EUA., 2006.

SOUZA, Petrônio Noronha de. **Programas Espaciais e a Tecnologia de Satélites**. São José dos Campos, SP, out. 2010. Disponível em: <https://educacaoespacial.files.wordpress.com/2010/10/ijespacial_04_tecnologia_de_satelites.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2017.

SPACEDAILY. **History of the CubeSat**. Disponível em: <http://www.spacedaily.com/reports/History_of_the_CubeSat_999.html>. Acesso em: 16 nov. 2017.

THERMACORE a). **Axially grooved heat pipes**. Disponível em <<http://www.thermacore.com/products/axially-grooved-ammonia-heat-pipe.aspx>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

THERMACORE. B)Heat pipe technology. Disponível em <<http://www.thermacore.com/thermalbasics/heat-pipe-technology.aspx>>.. Acesso em: 2 jul. 2018

THOME, J. et al. Flow boiling of ammonia and hydrocarbons: **A state-of-the-art review. International Journal of Refrigeration**, v. 31, p. 603-620, 2008.

TSOUKNIDAS, A. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: a review. *Advances in Tribology*, 2011.

VASILIEV, L.L., Micro and miniature heat pipes – Electronic component coolers, **Applied Thermal Engineering**, Abr. 2006.

YADROITSEV, I.; BERTRAND, P.; SMUROV, I. Parametric analysis of the selective laser melting process. **Applied surface science**, v. 253, n.19, p. 8064-8069, 2007.

WOLF, F. G.; **Modelagem da interação fluido-sólido para simulação de molhabilidade e capilaridade usando o modelo Lattice-Boltzmann**. UFSC, Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2006

ZHANG, L.; LEE, W. L. Evaluating the use heat pipe for dedicated ventilation of office buildings in Hong Kong. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 4, p. 1983-1989, 2011.

APÊNDICE A – ROTINA EM EES DO MODELO ANÁLITICO TÉRMICO

```
PROCEDURE FLUIDO(FLUIDO$;T:P;k_l;cp_l;cp_v;rho_l;rho_v;sigma;mu_l;mu_v;h_l;h_v;h_lv)
```

```
IF FLUIDO$='METANOL' THEN
```

```

    P= 1000*(5,08367E-09*T^5 + 8,79965E-07*T^4 + 1,14263E-04*T^3 + 6,61679E-03*T^2 +
    2,52220E-01*T+ 3,94334)
    h_lv=1000*exp(7,1001-1,6650*10^(-3)*T+4,2482*10^(-5)*T^2-8,2591*10^(-7)*T^3+5,2087*10^(-
    9)*T^4-1,1710*10^(-11)*T^5)*1,0065
    rho_l=1000*exp(-2,0054*10^(-1)-5,5461*10^(-3)*T+1,8492*10^(-4)*T^2-2,6081*10^(-
    6)*T^3+1,4646*10^(-8)*T^4-2,8794*10^(-11)*T^5)
    rho_v=3,43454E-11*T^5 + 1,18525E-08*T^4 + 1,17365E-06*T^3 + 8,99151E-05*T^2 + 3,40548E-
    03*T + 5,71278E-02:
    mu_l=1*10^(-3)*exp(-2,0529*10^(-1)-1,8685*10^(-2)*T+1,2225*10^(-4)*T^2-1,0701*10^(-
    6)*T^3+4,5665*10^(-9)*T^4-7,2697*10^(-11)*T^5)*1,0035
    mu_v=1*10^(-7)*exp(4,4794+3,3930*10^(-3)*T-4,0163*10^(-6)*T^2-7,3376*10^(-
    8)*T^3+2,4641*10^(-10)*T^4-2,1042*10^(-13)*T^5)*1,0028
    sigma=1*10^(-3)*exp(3,2019-6,2365*10^(-3)*T+1,1123*10^(-4)*T^2-1,7652*10^(-
    6)*T^3+1,0660*10^(-8)*T^4-2,4530*10^(-11)*T^5)*1,0065
    cp_l=Cp(methanol;T=T;x=0)
    cp_v=Cl(methanol;T=T;x=1)
    k_l=Conductivity(methanol;T=T;x=0)
    h_l=Enthalpy(methanol;T=T;x=0)
    h_v=Enthalpy(methanol;T=T;x=1)

```

```
ENDIF
```

```
END
```

```
FUNCTION Pn (ESTRUTURA_CAPILAR$; rho_l;D_v;psi)
```

```

    if ESTRUTURA_CAPILAR$='SINTERIZADO' then P_n=rho_l*9,81*D_v*cos(psi)
    Pn=P_n
end

```

```
FUNCTION k_w (material_tubos$; T)
```

```

    if material_tubos$='titanio' then kw=k_('Titanium';
T)

```

```

    k_w=kw
end

```

```
FUNCTION theta_ver (ESTRUTURA_CAPILAR$; theta)
```

```

    if ESTRUTURA_CAPILAR$='SINTERIZADO' then theta=0
    theta_ver=theta
end

```

PROCEDURE

```
ESTRUTURA_CAPILAR(ESTRUTURA_CAPILAR$;mesh;D_interno;Espessura_camada;rs;Nr;ncamadas;Porosidade;lado_quadrado;k_l;kw;dwire:Entretelas;N;Esp_telas;per_v;D_v;A_v;r_v;Aw;rhl;rhv;rc;epsilon;K;fRe_ranhura;hr;wr;keff;wf)
```

```
IF ESTRUTURA_CAPILAR$='SINTERIZADO' THEN
```

```

    D_v=D_interno-2*Espessura_camada
    r_v=D_v/2
    A_v=(pi*D_v^2/4)
    per_v=pi*D_v
    Dhv=4*A_v/per_v
    rhv=Dhv/2
    Aw=(pi*D_interno^2/4)-A_v
    keff=k_l*((2*k_l+kw)-2*(1-Porosidade)*(k_l-kw))/((2*k_l+kw)+(1-Porosidade)*(k_l -
kw))

```

```
    "Porosidade=0.5"
```

```
    K=((rs^2)*Porosidade^3)/(37,5*(1-Porosidade)^2)
```

```
    rc=rs
```

```
    {dwire = 1}
```

```
    "ncamadas = 1"
```

```
    Entretelas = 1
```

```
    pol=1
```

```
    N=1
```

```
    Esp_telas= 1
```

```
    rhl=1
```

```
    epsilon=1
```

```
    fRe_ranhura=1
```

```
    "lado_quadrado=1"
```

```
    hr=1
```

```
    wr=1
```

```
    wf=1
```

```
ENDIF
```

```
END
```

```
"!VARIAVEIS DE ENTRADA!"
```

```
"SINTERIZADO"
```

```
"Espessura_camada=2e-3 "
```

```
"rs=80e-6"
```

```
"RANHURA"
```

```
"hr=0.5e-3"
```

```
"wr=0.5e-3"
```

```
"Nr=10"
```

```
"Ladia=1
```

```
Levap=7
```

```
Lcond=1"
```

```
"D_externo=50e-3
```

```
Espessura_parede=2e-3"
```

$D_{ext}=D_{externo}/1000$

$D_{interno}=(D_{ext})-2*(Espessura_{parede}/1000)$

$L=Ladia+Levap+Lcond$

$Lef=(Levap/2)+Ladia+(Lcond/2)$

$C=1$

$fRe_v=16$

"psi=0"

$kw=k_w (material_tubos; T)$

CALL FLUIDO(FLUIDO\$;T:P;k_l;cp_l;cp_v;rho_l;rho_v;sigma;mu_l;mu_v;h_l;h_v;h_lv)

CALL

ESTRUTURA_CAPILAR(ESTRUTURA_CAPILAR\$;mesh;D_interno;Espessura_camada;rs;Nr;ncamadas;Porosidade;lado_quadrado;k_l;kw;dwire:Entretelas;N;Esp_telas;per_v;D_v;A_v;r_v;Aw;rhl;rhv;rc;epsilon;K;fRe_ranhura;hr;wr;keff;wf)

"% Pressão Capilar %"

$\theta=\theta_{ver} (ESTRUTURA_CAPILAR\$; \theta)$

$P_{cm}=2*\sigma*\cos(\theta)/rc$

"% Pressão de Vapor e Líquido %"

$F_v=((fRe_v*\mu_v)/(2*rhv**2*A_v*rho_v*h_lv))*Lef$

$\Delta P_v=((fRe_v*\mu_v)/(2*rhv**2*A_v*rho_v*h_lv))*Lef*q$

$F_l=(\mu_l/(\rho_l*K*Aw*h_lv))*Lef$

$\Delta P_l=(\mu_l/(\rho_l*K*Aw*h_lv))*Lef*q$

"% Pressão de hidrostática axial e normal %"

$P_n=P_n (ESTRUTURA_CAPILAR\$; \rho_l; D_v; \psi)$

$P_a=\rho_l*9,81*L*\sin(\psi)$

"% Limite capilar%"

$P_{pm}=(P_{cm}-P_n-P_a)$

$P_{cm}=\Delta P_l+\Delta P_v+P_n+P_a$

"% Resistências %"

$R_{pe}=(\ln(D_{ext}/D_{interno})/(2*\pi*Levap*kw))$

$R_{we}=(\ln(D_{interno}/D_v)/(2*\pi*Levap*keff))$

$R_{va}=T*\Delta P_v/(h_lv*rho_v*q)$

$R_{wc}=(\ln(D_{interno}/D_v)/(2*\pi*Lcond*keff))$

$R_{pc}=(\ln(D_{ext}/D_{interno})/(2*\pi*Lcond*kw))$

$R=R_{pe}+R_{we}+R_{va}+R_{wc}+R_{pc}$

ANEXO A DATASHEET DO PÓ DE TITÂNIO



Ti64 -53/20

Titanium Alloy Powder Ti-6Al-4V -53µm +20µm

KEY FEATURES

- ▶ Suitable for the most demanding industrial applications.
- ▶ Excellent flowing properties
- ▶ Plasma atomized powder
- ▶ High packing density
- ▶ High purity material
- ▶ *ASTM B348-13 Grade 23, F136-13, F1472-14, F1580-12, F3001-14*

Our unique plasma atomization process produces a highly spherical Titanium alloy powder, which combines high packing density and excellent flowing properties. Our spherical Ti64 powder is the material of choice for Additive Manufacturing and Metal Injection Moulding. Our -53 +20µm Ti-6Al-4V powder is also compatible with the most demanding industrial markets.





2895 INDUSTRIAL BLVD., SHERBROOKE, QC, J1L 2T9
+1 819.820.7771, INFO@TEKNA.COM
WWW.TEKNA.COM

TYPICAL PROPERTIES

Product number: 34131

Particle Size Distribution

Size (μm) +53	Typical Results: < 2% Max: 5%
Size (μm) -53+20	Typical Results: > 90% Min: 85%
Size (μm) -20	Typical Results: > 5% Max: 10%
Laser scattering (Microtrac) D10	Typical Results: > 25 μm Min: 20 μm

Chemistry

Titanium	Balance	Nitrogen	< 0.04%
Aluminum	6.0 - 6.5%	Hydrogen	< 0.012%
Vanadium	3.5 - 4.5%	Carbon	< 0.08%
Iron	< 0.25%	Yttrium	< 0.005%
Oxygen	< 0.10%		

Density

Tap Density	> 2.7g/cm ³	Apparent Density	> 2.2g/cm ³
-------------	------------------------	------------------	------------------------

INDUSTRIES



AEROSPACE



MEDICAL

APPLICATIONS

ADDITIVE
MANUFACTURING

THERMAL
SPRAY

ABOUT TEKNA

Tekna is the world leader in induction plasma technology and manufacturing turnkey systems. With 25 years of industrial experience Tekna is able to offer the power of inductive plasma technology to manufacture high value materials in commercial quantities and to the highest quality standards.



MANUFACTURED BY TEKNA ADVANCED MATERIALS INC.
AN ISO 9001:2008 CERTIFIED COMPANY.

TEKNA
2895 INDUSTRIAL BLVD., SHERBROOKE, QC, J1L 2T9
+1 819.820.7771, INFO@TEKNA.COM
WWW.TEKNA.COM